



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

**INPE-9656-TDI/849**

**MANUTENÇÃO ZONAL DA CORRENTE DE JATO SOBRE A  
AMÉRICA DO SUL**

Gilsânia de Souza Cruz

Dissertação de Mestrado em Meteorologia, orientada pelos Drs. Vadlamudi  
Brahmananda Rao e Manoel Alonso Gan, aprovada em 7 de abril de 1998.

551.557.2 (8)

CRUZ, G. S.

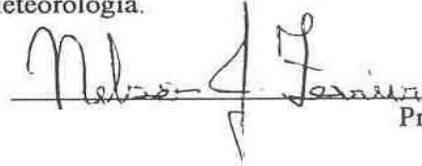
Manutenção zonal da corrente de jato sobre a América do Sul/ G.S.Cruz – São José dos Campos: INPE, 2001.

100p. – (INPE-9656-TDI/849).

1.Manutenção. 2.Correntes de jato. 3.América do Sul.  
4.El Niño. 5.La Niña. 6.Inverno. 7.Energia cinética.  
I.Título.

Aprovada pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para a obtenção do Título de Mestre em Meteorologia.

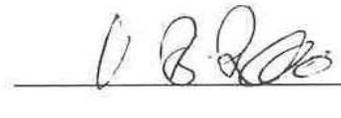
Dr. Nelson Jesus Ferreira

  
Presidente

Dr. Manoel Alonso Gan

  
Orientador

Dr. Vadlamudi Brahmananda Rao

  
Orientador

Dr. Kioshi Hada

  
Membro da Banca

Dra. Natália Fedorova

  
Membro da Banca  
- Convidado -

Candidato: Gilsânia de Souza Cruz

São José dos Campos, 07 de abril de 1998



Ao *Carlos Eduardo* por todo  
seu amor, dedicação e  
paciência.

Aos meus pais pelo eterno  
respaldo.



## **AGRADECIMENTOS**

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, pela disponibilidade de equipamentos e serviços essenciais ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos Drs. Vadlamudi Brahmananda Rao e Manoel Alonso Gan pela competente e séria orientação, pelo companheirismo e amizade.

Aos Drs. Nelson Jesus Ferreira, Kioshi Hada e Natália Fedorova pela acessibilidade.

Aos funcionários e amigos da Divisão de Meteorologia pela boa vontade e competência.

Aos amigos Joana Darc Maduga, Marcelo Brauer, Eliane Coutinho, Luís Gustavo Gonçalves, Hélio Camargo, Natália Solorzano, Marcos Oyama, Júlio Tota, Nadja Batista, Rita Andreoli pelo apoio e incentivo necessários ao longo desta jornada. Um especial agradecimento aos colegas Júlio Pablo Fernandez e Mário Quadro pela prontidão.

A todos meus colegas, pelos divertidos momentos.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo, sem a qual não seria possível o desenvolvimento desta dissertação.

A todas as outras pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para que a execução deste trabalho se tornasse uma etapa agradável.



## RESUMO

Dois métodos foram utilizados para explicar a manutenção da corrente de jato sobre a América do sul na estação de inverno. O primeiro, baseia-se na análise do balanço de energia cinética total através da circulação transversal em torno da corrente de jato pelo vento ageostrófico. A corrente de jato para os períodos de El-Niño, La Niña, e outros anos estudados pode ser localmente mantida pelo balanço entre a energia cinética gerada pelo escoamento ageostrófico e a divergência do fluxo de energia. Essas circulações transversais direta e indireta são responsáveis pelas trocas de energia potencial disponível para cinética na entrada da corrente de jato, e pelas trocas de energia cinética para potencial na saída da corrente de jato. Ressaltando ainda que o estudo dessas circulações devem evidenciar áreas de divergência-convergência tanto na alta como na baixa troposfera. Esses padrões dependendo da energia disponível, podem gerar instabilidades que favoreçam o surgimento e manutenção de sistemas convectivos de mesoescala. No segundo a manutenção da corrente de jato é estudada utilizando o conceito de energia cinética do estado básico e turbulento. No período de El Niño a corrente de jato se mantém intensa por uma troca de energia potencial disponível turbulenta para cinética turbulenta ( $Pe \Rightarrow Ke$ ) através de movimentos verticais, seguida de uma troca de energia cinética turbulenta para cinética do estado básico ( $Ke \Rightarrow Km$ ), e ainda uma troca de energia cinética do estado básico para potencial do estado básico ( $Km \Rightarrow Pm$ ), devido a movimentos forçados pela célula de Ferrel. Durante o período de La Niña a corrente de jato encontra-se perdendo energia cinética do estado básico para os movimentos forçados pela célula de Ferrel ( $Km \Rightarrow Pm$ ) e para os distúrbios baroclinicos ( $Km \Rightarrow Ke$ ), precedida de uma troca de energia potencial disponível turbulenta para cinética turbulenta ( $Pe \Rightarrow Ke$ ) através de movimentos verticais, desintensificando desta forma a corrente de jato.



## JET STREAM MAINTENANCE OVER SOUTH AMERICA

### ABSTRACT

Two methods were used to explain the maintenance of the jet stream over South America on the winter season. The first one is based in the analysis of the total Kinetic energy budget through the transversal circulation around the jet stream by the ageostrophic wind. The jet stream for El Niño and La Niña events, and years without the presence of these two events may be locally maintained by the budget between the kinetic energy generated by the ageostrophic flow and the energy of flux divergence. The transversal direct and indirect circulations are responsible for the conversion of available potential energy into kinetic in the entrance regions of the jet stream, and for the conversion of kinetic energy into potential in the exit regions of the jet stream. The study of those circulations may evidence areas of divergence-convergence both in the high and low troposphere. The patterns, depending on the available energy, may generate instabilities which may favor the occurrence and maintenance of mesoscale convective systems. In the second method the maintenance of the jet stream is studied through the definition of kinetic energy of the basic state and eddies. During El Niño events the jet stream intensity is kept by a conversion of turbulent available potential energy into turbulent kinetic energy ( $Pe \Rightarrow Ke$ ) through vertical movements followed by a conversion of kinetic turbulent energy into kinetic energy of the basic state ( $Ke \Rightarrow Km$ ), and a conversion of kinetic energy of the basic state into potential energy of the basic state ( $Km \Rightarrow Pm$ ), owing to forced movements. During La Niña events the jet stream loses kinetic energy of the basic state to the forced movements ( $Km \Rightarrow Pm$ ) and to the baroclinic disturbances ( $Km \Rightarrow Ke$ ), preceded by a conversion of turbulent potential energy into turbulent kinetic energy ( $Pe \Rightarrow Ke$ ) through vertical movements, thus weakening the jet stream.



# SUMÁRIO

Pág.

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE TABELAS

## LISTA DE SÍMBOLOS

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	25
1.1 - Objetivos .....	26
1.2 - Definição da Corrente de Jato .....	27
1.2.1 - Corrente de Jato Subtropical .....	28
1.2.2 - Corrente de Jato Polar .....	29
1.3 - Influência Sobre a América do Sul .....	30
1.4 - Manutenção .....	35
<b>CAPÍTULO 2 - PRINCÍPIOS DINÂMICOS RELACIONADOS COM A CIRCULAÇÃO E MANUTENÇÃO DO JATO</b> .....	37
2.1 - Circulação da Corrente de Jato .....	37
2.1.1 - Escoamento Ageostrófico .....	37
2.1.2 - Padrão Resultante de Divergência .....	40
2.1.3 - Circulações Transversais .....	41
2.2 - Manutenção do Fluxo de Momentum e Energia .....	41
2.2.1 - Equação para Manutenção de Momentum $\bar{u}$ .....	42
2.2.2 - Manutenção de Energia Cinética .....	44

<b>CAPÍTULO 3 - DADOS E METODOLOGIA.</b> .....	<b>49</b>
3.1 - Seleção de Dados. ....	49
3.2 - Ferramentas Utilizada. ....	49
3.3 - Metodologia. ....	50
3.3.1 - Manutenção da Corrente de Jato a partir das circulações transversais. ....	50
3.3.2 - Manutenção da Corrente de Jato a partir das trocas de energia cinética. ....	51
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS.</b> .....	<b>53</b>
4.1 - Manutenção da Corrente de Jato (CJ) utilizando o vento ageostrófico.....	53
4.1.1 - Análise Climatológica Média da CJ.....	53
4.1.2 - Circulações Transversais em Altos Níveis.....	58
4.1.2 a - El Niño (1983,87,93).....	58
4.1.2 b - La Niña (1984,88,89). ....	60
4.1.2 c - Outros Anos (1982,85,86,90-92,94).....	62
4.1.3 - Circulações Transversais em Baixos Níveis. ....	66
4.2 - Manutenção da Corrente de Jato através das trocas de energia cinética. ....	72
4.2.1 - El Niño. ....	73
4.2.2 - La Niña.....	77
4.2.3 - Contrastes Climatológicos para El Niño e La Niña. ....	80
<b>CAPÍTULO 5 - SUMÁRIO E CONCLUSÕES.</b> .....	<b>85</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.</b> .....	<b>89</b>
<b>APÊNDICE A - COMPONENTES DO BALANÇO DE ENERGIA CINÉTICA DO ESTADO BÁSICO E TURBULENTO PARA O EL NIÑO DE 1983.</b> .....	<b>93</b>

**APÊNDICE B - COMPONENTES DO BALANÇO DE ENERGIA CINÉTICA DO  
ESTADO BÁSICO E TURBULENTO PARA A LA NIÑA DE 1984. ....97**



## LISTA DE FIGURAS

Pág.

1.1 - Representação esquemática do eixo da corrente de jato. Retirada de Medina, 1976 -----	28
1.2 - Seção vertical para o dia 15/10/54 às 15 TMG, aproximadamente ao longo do paralelo 40°N e normal ao forte escoamento em altos níveis. A convecção é plotar o vento como se fosse de norte no topo da figura. Linhas tracejadas, são isotermas; linhas cheias, as camadas frontais ou tropopausas; linhas sólidas, as isotacas do vento observado em intervalos 10 ms <sup>-1</sup> , sem levar em conta a direção. Retirada de Palmén, 1969-----	30
1.3 - Configuração típica da nebulosidade e escoamento do vento em altos níveis, relacionada a permanência das zonas frontais no Sul e Sudeste do Brasil. Linha tracejada-pontilhada, CJS; linha tracejada, CJP. Imagem do canal infravermelho SMS/GOES de 1983. Retirada de Kousky e Cavalcanti, 1984 -----	32
2.1 - (a) Padrão idealizado de movimento ageostrófico e divergência próximo a CJ; (b) Circulação transversal indireta; (c)Circulação transversal direta. Retirada de Guedes, 1985 -----	39
4.1 - (a) Distribuição média do vento zonal em intervalos de 5ms <sup>-1</sup> ; (b) Desvio padrão médio do vento zonal em intervalos de 0.5 ms <sup>-1</sup> -----	54
4.2 - Distribuição interanual do vento zonal em intervalos de 5 ms <sup>-1</sup> para o período de 1982-1994-----	56
4.3 - Isotacas do vento zonal (linhas contínuas) em intervalos de 2 m/s e a componente meridional do vento ageostrófico (setas) ao nível de 200 hPa para os período de El Niño (a)JJA 1983; (b)JJA 1987; (c)JJA 1993-----	59
4.4 - Isotacas do vento zonal (linhas contínuas) em intervalos de 2 m/s e a componente meridional do vento ageostrófico (setas) ao nível de 200 hPa para os período de La Niña (a)JJA 1984; (b)JJA 1988; (c)JJA 1989 -----	61
4.5 - Isotacas do vento zonal (linhas contínuas) em intervalos de 2 m/s e a componente meridional do vento ageostrófico (setas) ao nível de 200 hPa para os outros anos (a)JJA 1982; (b)JJA 1985; (c)JJA 1996; (d)JJA 1990; (e)JJA 1991; (f)JJA 1992; (g)JJA 1994 -----	63

- 4.6 - Seções verticais de vento ageostrófico em intervalos de  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  na CJS para entrada (a) e saída da CJ (b) no El Niño 1983; entrada (c) e saída da CJ(d) no La Niña 1984; entrada (e) e saída da CJ (f) em 1990. Isolinhas tracejadas indicam vento ageostrófico negativo; isolinhas sólidas vento ageostrófico positivo no intervalo de  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ -----64
- 4.7 - Componentes do estado básico e turbulento do balanço de energia cinética médio. Lado esquerdo, fenômeno El Niño; lado direito, fenômeno La Niña. Unidades: Caixas:  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ , conversões:  $\text{m}^2\text{s}^{-3}$ . )-----76
- 4.8 - Componentes do estado básico e turbulento do balanço de energia cinética. Lado esquerdo, trocas de energia ocorridas durante o fenômeno El Niño; lado direito, trocas de energia ocorridas para o fenômeno La Niña. Unidades: Caixas:  $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ , conversões:  $\text{m}^2\text{s}^{-3}$ . )-----79
- 4.9 - Média do vento zonal em intervalos de  $5 \text{ ms}^{-1}$ ; (a) Período El Niño; (b) Período La Niña; (c) Contraste entre El Niño e La Niña em intervalos de  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ -----81
- 4.10 - Média corrida de cinco dias do vento zonal em  $\text{ms}^{-1}$  para o período de inverno; (a,b,c) El Niño; (d,e,f) La Niña.-----83

## LISTA DE TABELAS

Pág.

<i>1.1 - Totais de casos ocorridos com desvios positivos, superiores a 0 m/s. Adaptada de Pezzi e Cavalcanti, 1994</i>	33
<i>1.2 - Totais de casos ocorridos com desvios superiores a 10 m/s. Adaptada de Pezzi e Cavalcanti, 1994</i>	33
<i>4.1 - Balanço médio de energia cinética do estado básico (Km)</i>	72
<i>4.2 - Balanço médio de energia cinética turbulenta (Ke)</i>	73



## LISTA DE SÍMBOLOS

$a$	- Raio médio da terra (m)
$ag$	- Ageostrófico
$f$	- Parâmetro de coriolis ( $s^{-1}$ )
$F$	- Força friccional (N)
$g$	- Geostrófico
$p$	- Pressão (coordenada vertical), ou relativo a uma superfície isobárica (hPa)
$R$	- Constante específica dos gases ( $mol^{-1}K^1$ )
$T$	- Temperatura ( $^{\circ}K$ )
$u$	- Componente zonal do vento ( $ms^{-1}$ )
$v$	- Componente meridional do vento ( $ms^{-1}$ )
$z$	- Altura geopotencial (m)
$x, y, p$	- Eixos dos sistemas de coordenadas utilizadas
$x$	- Coordenada horizontal, apontando para leste ou paralela ao jato
$y$	- Coordenada horizontal, apontando para norte ou normal ao jato
$\phi$	- Geopotencial em uma superfície de pressão constante (mgp)
$\lambda$	- Longitude
$\varphi$	- Latitude
$\omega$	- Velocidade vertical no sistema de coordenada $p[=dp/dt]$ ( $Pa s^{-1}$ )
$v_{ag}$	- Componente meridional do vento ageostrófico ( $ms^{-1}$ )
$v_g$	- Componente meridional do vento geostrófico ( $ms^{-1}$ )



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A.S.	- América do Sul
CJS	- Corrente de Jato Subtropical
CJP	- Corrente de Jato Polar
ECMWF	- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
Grads	- Grid Analysis and Display System
H.S	- Hemisfério Sul
JJA	- Junho, Julho, Agosto
Km	- Energia Cinética do estado básico
Ke	- Energia Cinética Turbulenta
NCEP	- National Centers for Environmental Prediction
PE	- Modelo simples de duas camadas
Pe	- Energia potencial disponível turbulenta
Pm	- Energia potencial disponível do estado básico



## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

Em altos níveis da atmosfera, próximo à tropopausa, existe uma região onde os ventos de oeste, adquirem velocidades máximas. A velocidade desses ventos aumenta com altura, a partir da superfície terrestre, devido à existência de gradientes meridionais de temperatura diminuindo para o pólo. Esse escoamento caracterizado por valores máximos de vento acima de 30 m/s é denominado corrente de jato ou simplesmente jato.

A descoberta do Jato, segundo Riehl (1969), foi uma grande surpresa, ocorrendo durante a Segunda Guerra Mundial, quando aviões bombardeiros sobrevoavam as Ilhas Japonesas a uma altura de aproximadamente de 10.000 metros. Algumas vezes os aviões permaneciam praticamente parados em relação ao solo, em virtude da existência de ventos fortes em sentido contrário. Observações realizadas à superfície de Cirros que se moviam rapidamente, também revelaram que os ventos em altitude deveriam possuir alta velocidade.

Desde a época da identificação da corrente de jato, até a atualidade, poucos foram os estudos sobre a dinâmica e os efeitos no tempo desses fortes ventos zonais em altos níveis que atuam sobre a América do Sul. Entretanto, sabe-se que no sul da América do Sul, as correntes de jato estão associadas a bloqueios, sistemas frontais e sistemas convectivos, principalmente durante o inverno, quando os ventos de oeste estão mais intensos. Já no Brasil, as correntes de jato são responsáveis pelo desenvolvimento ou intensificação da convecção nas regiões sul e sudeste do País (Kousky e Cavalcanti 1984).

Motivados pela natureza persistente da corrente de jato, principalmente na estação de inverno, e a grande influência que a mesma tem sobre as variações de tempo sobre a

América do Sul, é de grande importância aprimorar os conhecimentos dos mecanismos que mantêm essa corrente intensa sobre essa região, de forma que a previsão de tempo tenha um maior grau de confiabilidade. Consequentemente beneficiando vários setores econômicos e sociais altamente dependentes das condições de tempo, o que certamente reverterá em grandes benefícios sócio-econômicos.

### **1.1 - Objetivos**

O objetivo principal deste trabalho é conhecer melhor os mecanismos que mantêm a corrente de jato intensa sobre a região da América do Sul, e pretende-se através desse estudo aprofundar o conhecimento sobre a circulação transversal associada a manutenção zonal da corrente de jato sobre a América do Sul.

Como objetivos específicos tem-se:

- Fazer uma análise climatológica média para o período de estudo (1982-1994), da posição, variação latitudinal e intensidade da corrente de jato sobre a América do Sul;

- Calcular campos médios trimestrais do vento em 200 hPa e 850 hPa para o trimestre de inverno Junho, Julho e Agosto (JJA) do período citado acima. A partir disto, obter um cálculo da circulação transversal em torno da corrente de jato utilizando o vento ageostrófico, investigando as implicações desta circulação na energética do jato;

- Determinar a estrutura do campo de vento zonal para três anos de El-Niño (1983;1987;1993) e três anos de La-Niña (1984;1988;1989), e mostrar como a corrente de jato é mantida através das trocas de energia cinética neste período de seis anos, interpretando os possíveis contrastes entre esses fenômenos.

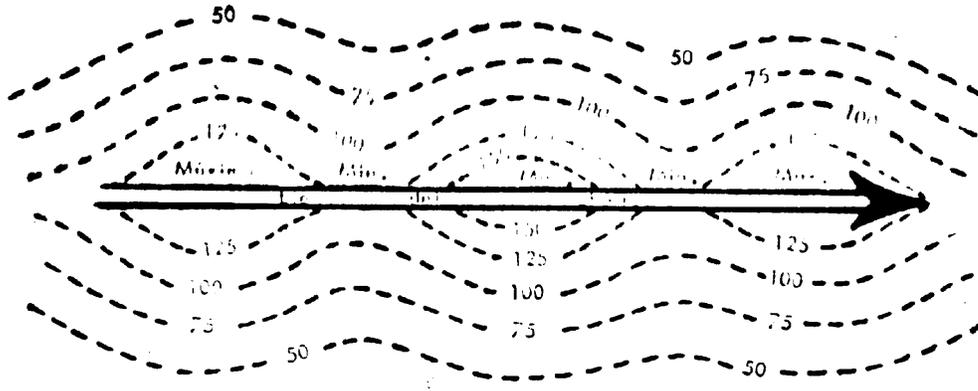
## 1.2 - Definição de Corrente de Jato

Alguns trabalhos já foram realizados sobre essa corrente de fortes ventos zonais em altos níveis. Dentre eles, um antigo histórico sobre corrente de jato pode ser encontrado em Riehl *et al.*(1952), onde ilustraram um modelo de circulação transversal nas vizinhanças da corrente de jato na alta troposfera. Beebe e Bates(1955) modificaram o modelo de Riehl *et al.* introduzindo efeitos de curvatura. Uma revisão sobre essa circulação vertical da corrente de jato foi feita por Reiter (1969), onde ele restabelece o interesse em sistemas de tempo que se desenvolvem nas vizinhanças do jato na alta troposfera. Progressos nessa época também foram alcançados por Newton (1954), através de estudos observacionais.

Dois tipos de corrente de jato, ambos localizados na descontinuidade da tropopausa, onde há mistura do ar troposférico e estratosférico, têm sido largamente investigados. A corrente de jato polar (CJP) ou simplesmente jato frontal, que encontrado em latitudes médias acima de 13 Km de altura, e a corrente de jato subtropical (CJS), que está geralmente confinada em latitudes de até 30° a aproximadamente 13 Km de altura (ou ~200 hPa). Normalmente, as correntes de jato fluem por uma extensão de ~ 1000 Km, com ~ 100 Km de largura e apenas ~ 1 Km de espessura. O cisalhamento vertical do vento é da ordem de 5-10 m/s por Km e o cisalhamento lateral, de 5 m/s por 100 Km.

A velocidade do vento no jato não é uniforme em toda a sua extensão horizontal. Existem máximos e mínimos locais nas isotacas, ao longo do eixo do jato. Esses núcleos de ventos máximos (nvm) embebidos na corrente de jato são referidos como “jet streaks”(Figura 1.1), nos quais a velocidade do vento pode atingir ou superar 125 nós. Frequentemente, esses máximos deslocam-se ao longo do eixo, no mesmo sentido do vento (Medina, 1976), mas a velocidade do vento no nvm de uma corrente de jato é maior do que a velocidade com que este núcleo se move. Esses nvm encontram-se presentes nos regimes de escoamento extratropical e, devido a sua importância como

precursores de ciclogênese e tempos severos, tem recebido significativa atenção da comunidade sinótica (Carlson 1991, Bluestein 1993).



**Fig. 1.1** - Representação esquemática do eixo da corrente de jato.

FONTE: Medina (1976).

### 1.2.1 - Corrente de Jato Subtropical

A CJS que está associada à circulação de Hadley, normalmente encontrando-se acima da porção descendente dessa célula, entre as latitudes de 20°S e 35°S. Esse jato é mais desenvolvido na estação de inverno onde a circulação média meridional é mais intensa (Hastenrath, 1990). Segundo Palmém e Newton (1969), a circulação de Hadley é um dos principais mecanismos para a manutenção da CJS.

A CJS é semi-permanente e a sua posição média desloca-se em direção ao equador no período de inverno e em direção aos pólos no verão, assim como toda a circulação atmosférica, devido a posição do sol (Palmén e Newton, 1969). No hemisfério sul, há menor variação sazonal da intensidade do jato, quando comparada com hemisfério norte (Palmén e Newton, 1969).

### **1.2.2 - Corrente de Jato Polar**

A CJP, diferenciando-se da CJS não é semi-permanente, está associada com o forte gradiente horizontal de temperatura, e em qualquer instante tende a coincidir com as estreitas zonas frontais em altos níveis (Pezzi *et al.*, 1996). A ocorrência de um núcleo de jato intenso acima da zona frontal em superfície é uma consequência do balanço do vento térmico. A CJP encontra-se geralmente entre as latitudes de 35°S a 70°S. A variação sazonal da sua posição é a mesma da CJS.

Um exemplo que mostra uma seção vertical idealizada da CJP pode ser vista na Figura 1.2. Pode-se perceber um aumento do vento com altura, comportamento encontrado em camadas onde o gradiente meridional de temperatura é forte. Observar-se uma pronunciada diminuição da velocidade do vento com altura acima da tropopausa, onde o gradiente meridional de temperatura é invertido ao da troposfera.

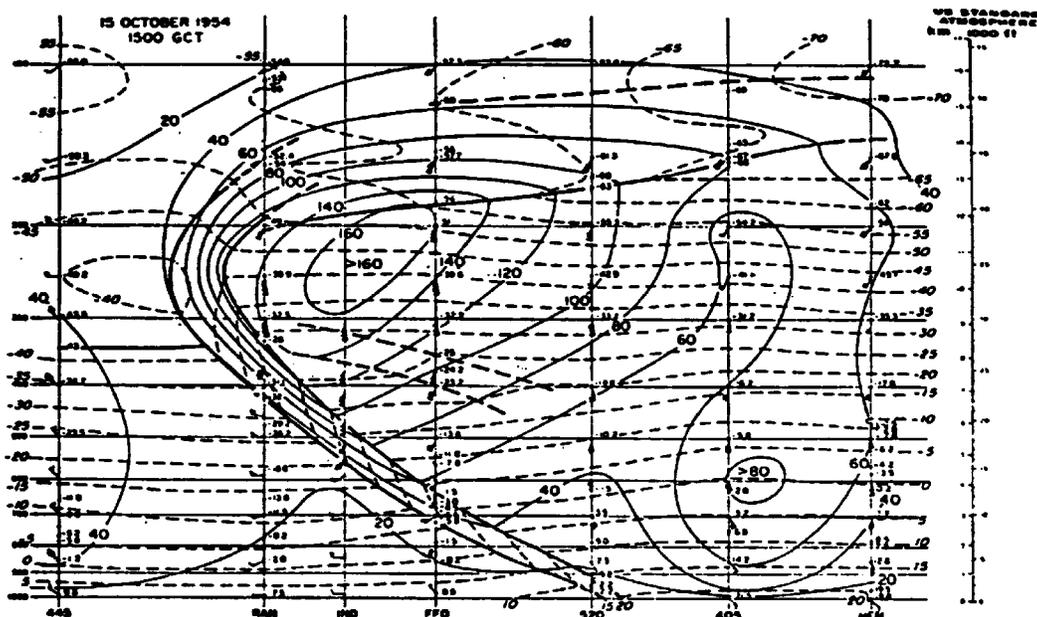


Fig. 1.2 - Seção vertical, para o dia 15/10/54 às 15 TMG, aproximadamente ao longo do paralelo 40°N e normal ao forte escoamento em altos níveis. A convenção é plotar o vento como se fosse de norte no topo da figura. Linhas tracejadas, são as isotermas (°C); linhas cheias, as camadas frontais ou tropopausas; linhas sólidas, as isotacas do vento observado em intervalos 10 m/s, sem levar em conta a direção.

FONTE: Palmén (1969).

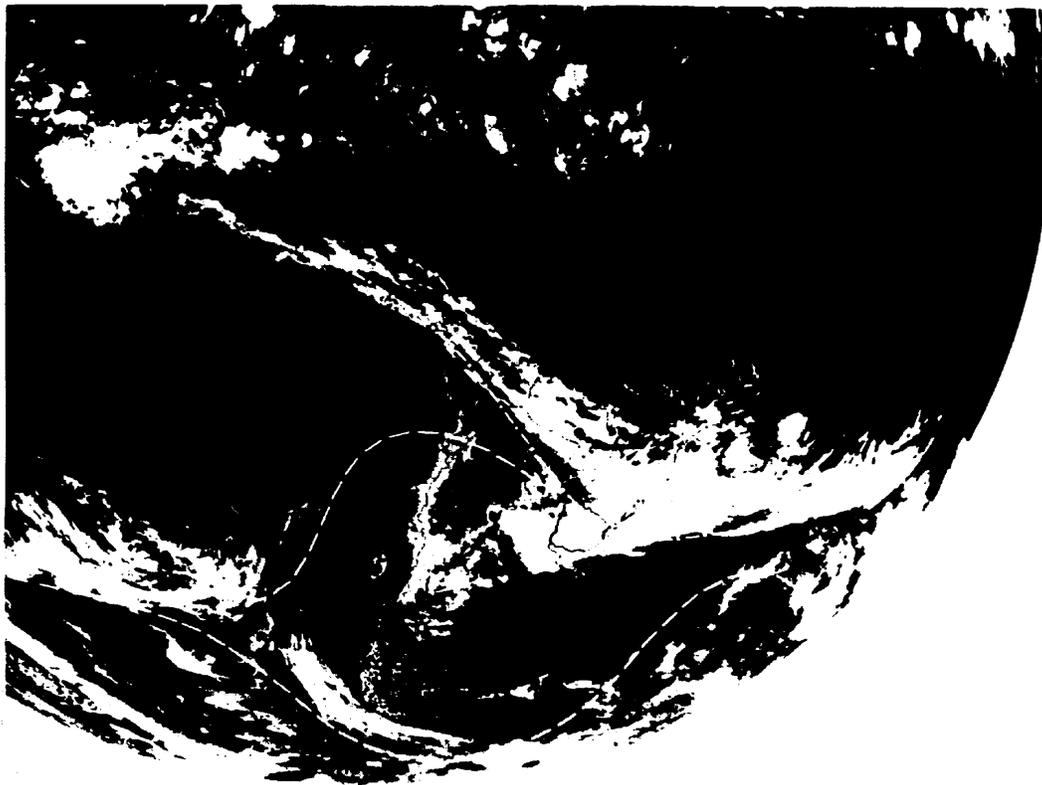
### 1.3 - Influência sobre a América do Sul

A influência da CJS sobre a América do Sul foi estudado em 1983 (ano de El Niño) por Kousky e Cavalcanti (1984) utilizando cartas de superfície e de escoamento do vento em altos níveis, juntamente com imagens de satélite, para 1982-1983. Os resultados obtidos pelos autores indicam uma CJS bem pronunciado sobre a América do Sul e o Pacífico Leste. Como sugerido por Bjerknes (1966), e comprovado por Arkin (1982), essa corrente atmosférica em altos níveis é intensificada na região do Pacífico Leste durante os anos de El Niño. Além disso, Kousky e Cavalcanti observaram várias situações de bloqueios nas vizinhanças destas regiões. Esses eventos favoreceram a

manutenção de sistemas frontais ativos no sul do Brasil, contribuindo para a excessiva precipitação que ocorreu na região. Na Figura 1.3, adaptada do trabalho de Kousky e Cavalcanti (1984) mostra-se uma imagem de satélite na qual se superpôs o escoamento do vento em altos níveis da atmosfera. Tem-se, nessa figura, um exemplo de configuração típica da nebulosidade e do escoamento de vento, associado à permanência de sistemas frontais no Sul do Brasil.

Nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, estudos observacionais como realizados por Nobre *et al.*(1986), Severo (1994) e Severo *et al.* (1994), mostram que dentre os sistemas meteorológicos responsáveis por chuvas intensas, estão aqueles em que é sugerida uma interação entre a CJS e sistemas frontais em baixos níveis. Entretanto, nestes trabalhos não se esclarece como esta interação ocorre e quais são seus possíveis mecanismos.

A associação do CJS com sistemas frontais, também foi estudada por Palmén (1969), segundo o autor a divergência e a convergência em altos níveis associada com ondas atmosféricas deveriam em geral ser mais pronunciada em regiões de ventos fortes. Desta forma, os distúrbios de escala sinótica (ciclones e anticiclones) são caracterizados por apreciável divergência-convergência e movimento vertical. Assim é natural esperar que esses sistemas mostrem alguma relação com a CJ.



**Fig. 1.3** - Configuração típica da nebulosidade e escoamento do vento em altos níveis, relacionada com a permanência das zonas frontais no Sul e Sudeste do Brasil. Linha tracejada-pontilhada, CJS; linha tracejada, CJP. Imagem no canal infravermelho SMS/GOES de 1983.

FONTE: Kousky e Cavalcanti (1984).

Pezzi e Cavalcanti (1994) fizeram uma análise climatológica sobre a posição e variação latitudinal da CJS sobre parte da América do Sul, no trimestre de inverno (JJA). Nesse estudo foram usados 10 anos de dados diários (1980-1989), provenientes do European Centre for Medium Range Weather Forecast (ECMWF), entre as latitudes de 60°S a 20°S e longitude de 40°W a 80°W. Na Tabela 1.1, reproduzida do trabalho de Pezzi e Cavalcanti (1994), verifica-se que o maior número de anomalias positivas de vento,

durante todo o inverno, ocorreu entre as latitudes de 30°S a 20°S e o máximo ocorreu no mês de agosto, com 172 casos para os desvios (anomalias) maiores que 0 m/s.

**TABELA 1.1 - TOTAIS DE CASOS OCORRIDOS COM DESVIOS POSITIVOS, SUPERIORES A 0 m/s**

<b>Mês\Área</b>	<b>60°S a 50°S</b>	<b>50°S a 40°S</b>	<b>40°S a 30°S</b>	<b>30°S a 20°S</b>
<b>Junho</b>	<b>130</b>	<b>140</b>	<b>151</b>	<b>140</b>
<b>Julho</b>	<b>152</b>	<b>162</b>	<b>153</b>	<b>170</b>
<b>Agosto</b>	<b>156</b>	<b>156</b>	<b>153</b>	<b>172</b>
<b>Total</b>	<b>438</b>	<b>458</b>	<b>457</b>	<b>482</b>

**FONTE:** Adaptada de Pezzi e Cavalcanti (1994).

Na Tabela 1.2 observa-se que os maiores números de casos com desvios superiores a 10 m/s ocorreram entre as latitudes de 60°S a 50°S e 50°S a 40°S, com um total de 82 e 83 casos, respectivamente. Na análise mensal os máximos ocorreram nas áreas de 40°S a 35°S (julho) e 30°S a 20°S (junho).

**TABELA 1.2 - TOTAIS DE CASOS OCORRIDOS COM DESVIOS SUPERIORES A 10 m/s**

<b>Mês\Área</b>	<b>60°S a 50°S</b>	<b>50°S a 40°S</b>	<b>40°S a 30°S</b>	<b>30°S a 20°S</b>
<b>Junho</b>	<b>31</b>	<b>29</b>	<b>19</b>	<b>32</b>
<b>Julho</b>	<b>31</b>	<b>28</b>	<b>32</b>	<b>25</b>
<b>Agosto</b>	<b>20</b>	<b>26</b>	<b>25</b>	<b>18</b>
<b>Total</b>	<b>82</b>	<b>83</b>	<b>76</b>	<b>75</b>

**FONTE:** Adaptada de Pezzi e Cavalcanti (1994).

Pezzi *et al.* (1996), também realizaram um trabalho sobre a climatologia da corrente de jato sobre a América do Sul. Foram calculados campos médios trimestrais de linhas de corrente em altos níveis (200hPa), entre as latitudes de 15°S a 55°S e longitude de 15°W a 55°W usando-se as análises do NCEP/NCAR para o período de 1985 a 1994. Os seguintes resultados das análises sazonais, interanuais e climatológicas foram observados nesse estudo:

- Trimestre de verão:

Em média a CJS praticamente desaparece prevalecendo a CJP ou extratropical. E de uma forma geral nos anos que ocorreu El Niño estendido, a CJP no Atlântico próximo a América do Sul foi mais forte.

- Trimestre de outono:

A CJS apresenta-se bem definido e em processo de intensificação. O fato mais significativo destes 10 anos é a ausência quase completa do jato no ano de 1989.

- Trimestre de inverno:

A CJS atinge a sua máxima intensidade sobre a América do Sul. Em média encontra-se oscilando na faixa latitudinal de 25°-30°S com configuração zonal ou uma suave inclinação de noroeste para sudeste.

- Trimestre de primavera:

A CJS começa a perder a força e o escoamento começa a apresentar uma curvatura anticiclônica em resposta ao aparecimento da Alta da Bolívia.

## 1.4 - Manutenção

A importância da corrente de jato foi reconhecida por Rossby e seus colaboradores (1947) a aproximadamente 50 anos atrás, a partir de então numerosos esforços tem sido feito para explorar os mecanismos que mantém essa corrente.

O estudo de Blackmon *et al.* (1977), foi de grande ajuda para entender a questão de como a corrente de jato climatológica é mantida, se por fluxos associados a vórtices transientes ou somente pelo escoamento médio no tempo. Os autores ilustraram a manutenção da CJS, usando a presença do escoamento ageostrófico médio meridional nas regiões de entrada e saída do jato para inferir a presença da circulação vertical. De acordo com o trabalho de Blackmon *et al.* a circulação na entrada do jato é termicamente direta com movimento ascendente no lado equatorial. Dessa forma, a energia cinética do jato é mantida por fontes térmicas de energia.

Por outro lado, Blackburn (1985), questiona a inferência direta da circulação vertical na entrada e saída da corrente de jato no padrão de vento ageostrófico. Segundo esse autor, problemas de interpretação surgem devido ao uso da definição de geostrofia usando o parâmetro de coriolis variável ou constante em estudos teóricos e análises de dados atmosféricos.

Holopainen (1978) também mostrou o mecanismo de circulação ageostrófica em termos de balanço de energia cinética. Segundo o autor a CJS é mantida pelo balanço entre a geração de energia cinética pela circulação ageostrófica e pela divergência do fluxo de energia cinética. Krishnamurti (1979), mostrou que o mecanismo de circulação ageostrófica proposto por Holopainen é relativamente um efeito regional, e que a interação inter-hemisférica entre a circulação rotacional e divergente é um importante

fator na manutenção da CJS. Mas segundo Chen *et al* (1988), ambos os mecanismos de Holopainen e Krishnamurti explicam a manutenção da CJS.

Mahlman (1973), examinou o balanço de energia cinética na CJP e revelou que a circulação transversal direta é provavelmente forte para manter a corrente de jato contra a dissipação, mas não o bastante para transportar uma grande quantidade de energia lateral. Embora, significantes quantidades de energia sejam transferidas para cima através da tropopausa, resultando em circulações transversais.

## CAPÍTULO 2

### PRINCÍPIOS DINÂMICOS RELACIONADOS COM A CIRCULAÇÃO E MANUTENÇÃO DA CORRENTE DE JATO.

#### 2.1 - Circulação da Corrente de Jato

A mera presença de uma corrente de jato ou núcleo de vento máximo assegura que algum processo de ajuste dos campos de massa e de vento está ocorrendo nas regiões de entrada e saída do jato. Obviamente, movimentos nessas regiões teriam alguma componente ageostrófica devido à mudanças de velocidade na entrada e saída da corrente de jato (Sechrist e Whitaker, 1979).

##### 2.1.1 - Escoamento Ageostrófico

Na região de entrada da corrente de jato, há uma aceleração ageostrófica da parcela de ar, pois a mesma se move para o centro do jato ou nvm. Na região de saída do jato, ocorre desaceleração ageostrófica. O resultado dessas acelerações ou mudanças de velocidade é dado pela componente zonal da equação simplificada do movimento em coordenadas de pressão:

$$\frac{du}{dt} - fv = -\frac{\partial\phi}{\partial x} \quad (2.1)$$

E sabendo que a componente meridional do vento geostrófico é:

$$v_g = \frac{1}{f} \frac{\partial\phi}{\partial x} \quad (2.2)$$

A Equação (1) pode ser reescrita como:

$$\frac{du}{dt} - fv = -fv_g \quad (2.3)$$

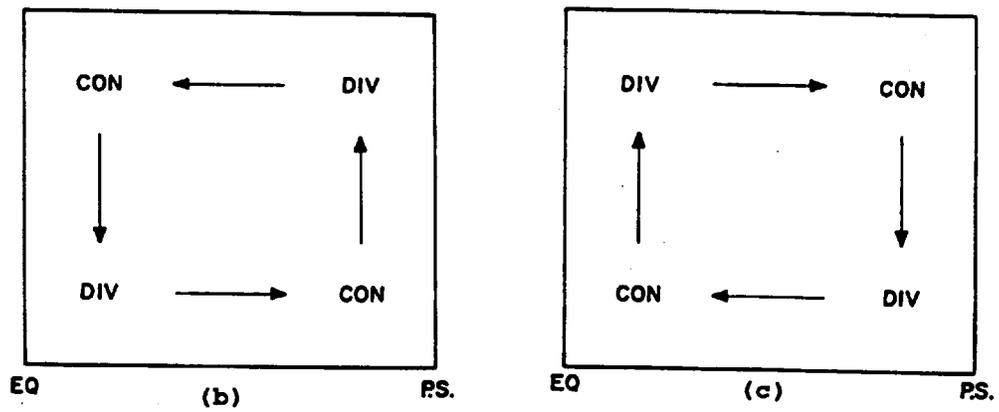
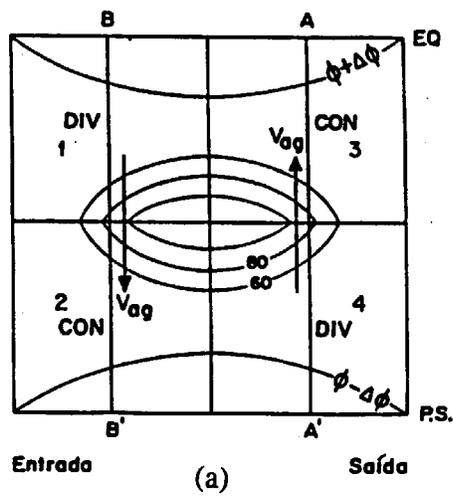
ou ainda:

$$\frac{du}{dt} = fv_{ag} \quad (2.4)$$

Onde:

$$v_{ag} = v - v_g \quad (2.5)$$

Utilizando-se a Equação (2.4), em conjunto com a análise da Figura 2.1, interpreta-se o padrão de circulação transversal para o H.S, onde o parâmetro de coriolis é negativo ( $f < 0$ ). Assim, nota-se na Figura 2.1 (a) na entrada da corrente de jato, onde a aceleração da parcela de ar é positiva ( $du/dt > 0$ ), a componente ageostrófica do vento é negativa ( $V_{ag} < 0$ ), sendo portanto direcionada para menores alturas geopotenciais (do equador para o pólo). Na saída da corrente de jato, a componente ageostrófica do vento é positiva ( $V_{ag} > 0$ ); portanto, ela é direcionada para maiores alturas geopotenciais (do pólo para o equador).



**Fig.2.1** - (a) Padrão idealizado de movimento ageostrófico e divergência próximo a corrente de jato; (b) Circulação transversal indireta; (c) Circulação transversal direta

FONTE: Guedes (1985).

### 2.1.2 - Padrão Resultante de Divergência

No caso de uma corrente de jato retilínea, os efeitos dinâmicos de curvatura são desprezíveis, e é esperado um padrão de quatro células de divergência-convergência. Na entrada da corrente de jato, onde a componente ageostrófica é direcionada para menores valores de altura geopotencial, ocorre divergência no primeiro quadrante e convergência no segundo. O contrário ocorre na saída da corrente de jato, onde se requer convergência no terceiro quadrante e divergência no quarto. Esses padrões de escoamento ageostrófico e divergência ao longo do jato podem ser visualizados através da Figura 2.1(a). São basicamente essas áreas de divergência na entrada e saída da corrente de jato, as responsáveis pelo desenvolvimento e intensificação da convecção nessas regiões, pois provocam movimento vertical ascendente, devido a convergência de massa em baixos níveis.

Para corrente de jato com curvatura, a regra dos quadrantes discutida acima não pode ser aplicada, pois é preciso levar em consideração os efeitos de curvatura, que são fortemente amplificados pelo padrão de escoamento meridional com grandes cavados e cristas.

Beebe e Bates (1955), sugeriram que uma corrente de jato com curvatura ciclônica (i.e., localizada na base de um cavado) teriam divergência e convergência mais pronunciadas no lado ciclônico. O oposto é verdadeiro para jatos com curvatura anticiclônica (i.e., localizado na crista). Esse efeito de curvatura também foi estudado por Moore e Vanknowe (1992), onde eles utilizaram um modelo simples de duas camadas (PE) de equações primitivas e encontraram que a corrente de jato com ambas as curvaturas ciclônica e anticiclônica, é acompanhada por um padrão de duas células de movimento vertical, o qual é significativamente maior que o encontrado no padrão de quatro células na corrente de jato retilínea. E ainda observaram que a curvatura anticiclônica gera divergência a leste do eixo da crista e convergência à oeste (H.S).

### 2.1.3 - Circulações Transversais

Analisando o corte feito na seção vertical (A-A') da Figura 2.1(a), na saída do nvm da corrente de jato, onde o padrão de divergência horizontal para circulação vertical pode ser mostrado na Figura 2.1(b), pode-se notar uma circulação indireta, ou seja, ar quente subsidindo ao norte e ar frio ascendendo ao sul. Dessa maneira, tem-se uma perda de energia cinética com conseqüente aumento de energia potencial disponível.

Agora analisando o corte vertical (B-B') da Figura 2.1(a), na entrada do nvm da corrente de jato, pode-se notar, através da Figura 2.1(c), uma circulação termicamente direta, isto é, ar quente ascendente e ar frio subsidindo. Assim, na entrada da corrente de jato, a energia potencial disponível é convertida em energia cinética. Através destas transformações de energia cinética para potencial disponível e vice-versa, pode-se entender como é feita a manutenção da corrente de jato através do padrão circulação ageostrófica.

## 2.2 - MANUTENÇÃO DO FLUXO DE MOMENTUM E ENERGIA

O fluxo de momentum apresenta um papel crucial na manutenção da distribuição média zonal do vento zonal na atmosfera terrestre. Desde o reconhecimento da corrente de jato, numerosos trabalhos tem sido feito explorando o mecanismo que mantém a corrente de jato. Baseados nisto Blackmon *et al.* (1977) ilustraram a manutenção da CJS com a circulação ageostrófica dirigida por ondas ciclônicas. Holopainen (1978) também mostrou o mecanismo de circulação ageostrófica em termos de balanço de energia cinética como citado anteriormente

Estudos de energética são essenciais para entender o problema da circulação geral e o papel dos diferentes tipos de distúrbios. Avaliações de trocas de energia providenciam uma avaliação plausível nas análises ou hipóteses. Por exemplo, algumas avaliações

são importantes na comparação dos resultados de modelos numéricos de circulação geral, contrastando as trocas de energia determinadas por observações na atmosfera real. Segundo Palmén e Newton (1969) a dificuldade de se estudar a energética, particularmente um distúrbio extratropical, surge devido a três principais aspectos: (1) ambigüidades na definição da fronteira de um sistema sinótico; (2) incertezas na avaliação de trocas de energia através da fronteira selecionada; (3) multiplicidade das formas as quais a energia pode ser expressada. Em seguida serão derivadas as equações para manutenção de momentum ( $\bar{u}$ ) e as equações de energia cinética do estado básico e da perturbação.

### 2.2.1 - Equação para Manutenção de Momentum $\bar{u}$

As equações do movimento horizontal em coordenadas esféricas podem ser escritas como:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial u}{\partial \varphi} - \omega \frac{\partial u}{\partial p} + \left( \bar{f} + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) v - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \phi}{\partial \lambda} - F_x \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \lambda} - \frac{v}{a} \frac{\partial v}{\partial \varphi} - \omega \frac{\partial v}{\partial p} - \left( \bar{f} + \frac{u \tan \varphi}{a} \right) u - \frac{1}{a} \frac{\partial \phi}{\partial \varphi} - F_y \quad (2.7)$$

onde  $\phi$  é o geopotencial,  $\bar{f}$  o parâmetro de Coriolis,  $\lambda$  a longitude,  $a$  o raio médio da terra,  $\varphi$  a latitude e  $F$  força friccional.

A manutenção zonal do fluxo de momentum será estudada somente pela Equação (2.6), pois, por análise de escala,  $\bar{u} \geq 10 \text{ m/s}$ , enquanto que  $\bar{v} \leq 1 \text{ m/s}$ . Assim a Equação (2.7) será utilizada somente no próximo item.

Agora será aplicado o método da perturbação na Equação original do movimento exibida em (2.6). Será introduzida a notação  $\bar{x}$  para indicar a média no tempo de uma determinada variável, e a notação  $x'$  para indicar o seu desvio em relação a média. Desta forma as variáveis da Equação (2.6) podem ser separadas em duas componentes:

$$u = \bar{u} + u' \quad (2.8a)$$

$$v = \bar{v} + v' \quad (2.8b)$$

$$\omega = \bar{\omega} + \omega' \quad (2.8c)$$

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.8d)$$

Portanto, aplicando-se a média no tempo, a Equação (2.6) fica:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = & -\frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \lambda} - \frac{\overline{u'}}{a \cos \varphi} \frac{\partial u'}{\partial \lambda} - \frac{\bar{v}}{a} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \varphi} - \frac{\overline{v'}}{a} \frac{\partial u'}{\partial \varphi} - \frac{\bar{\omega}}{a} \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} - \frac{\overline{\omega'}}{a} \frac{\partial u'}{\partial p} \\ & + f \bar{v} + \frac{\bar{u} \tan \varphi \bar{v}}{a} + \frac{\overline{u' \tan \varphi v'}}{a} - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \lambda} - \bar{F}_x \end{aligned} \quad (2.9)$$

Usando, a equação da continuidade em coordenadas esféricas:

$$\frac{\partial \omega}{\partial p} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial u}{\partial \lambda} + \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial v}{\partial \varphi} \cos \varphi = 0 \quad (2.10)$$

a Equação (2.9) pode ser reescrita como:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = & -\frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \lambda} - \frac{\bar{v}}{a} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \varphi} - \frac{\bar{\omega}}{a} \frac{\partial \bar{u}}{\partial p} - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \overline{u u'} - \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \overline{u' v'} - \frac{\partial}{\partial p} \overline{u' \omega'} \\ & + f \bar{v} + \frac{\bar{u} \tan \varphi \bar{v}}{a} - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \lambda} - \bar{F}_x \end{aligned} \quad (2.11)$$

Os três primeiros termos do lado direito da equação representam advecção de momentum  $\bar{u}$  pelo escoamento médio (incluindo o termo de convecção vertical). Esses termos não participam da manutenção ou dissipação do campo de  $\bar{u}$  momentum, somente deslocam  $\bar{u}$  de um lugar para o outro.

Os três termos seguintes representam a divergência do fluxo de momentum zonal  $\overline{u'u'}$ , meridional  $\overline{u'v'}$  e vertical  $\overline{u'\omega'}$ . Os quatro últimos termos representam aceleração pelo parâmetro de coriolis  $f\bar{v}$ , termo métrico devido a esfericidade da terra  $\frac{\bar{u} \tan \phi \bar{v}}{a}$ , gradiente zonal de pressão  $\frac{1}{a \cos \phi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \lambda}$  e pela força friccional  $\bar{F}_x$ . Nessa equação, os termos associados com o fluxo de momentum vertical são menos significativos, devido a ordem de grandeza da velocidade vertical, que quando comparada com a da velocidade horizontal é desprezível.

O objetivo de obter a manutenção de momentum zonal é fornecer subsídios para uma investigação preliminar de como este escoamento é mantido ao longo do tempo sobre a América do Sul. A longo prazo,  $\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = 0$ , ou seja,  $\bar{u} \Rightarrow \text{cte}$ . Sendo assim, torna-se relevante para o presente estudo entender não somente a física da manutenção do fluxo de momentum  $\bar{u}$ , mas também como ele é mantido através de trocas de energia cinética. Essas trocas de energia serão vista no próximo item.

### 2.2.2 -Manutenção de Energia Cinética

A energia cinética total (K) pode ser expressa como:

$$\frac{1}{2} \left( \overline{u^2 + v^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \overline{u^2} + \overline{v^2} \right) + \frac{1}{2} \left( \overline{u'^2 + v'^2} \right) \quad (2.12)$$

$$K = K_m + K_e \quad (2.13)$$

onde  $K_m$  é a energia cinética do estado básico e  $K_e$ , a energia cinética turbulenta.

Obtem-se as equações de energia cinética, utilizando as componentes zonal e meridional da equação do movimento. Fazendo algumas manipulações algébricas chega-se a equação de energia cinética do estado básico:

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial}{\partial t} K_m}_{(VK_m)} &= - \underbrace{\frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} K_m - \frac{\bar{v}}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} K_m - \bar{\omega} \frac{\partial}{\partial p} K_m}_{(AK_m)} \\ &\quad - \underbrace{K_m \frac{\overline{v \tan \varphi}}{a}}_{(TM)} - \underbrace{\frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \lambda} - \frac{\bar{v}}{a} \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial \varphi}}_{C(K_m, P_m)} - \underbrace{\bar{F}_x \bar{u} - \bar{F}_y \bar{v}}_{(D_m)} \\ &\quad - \bar{u} \left[ \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \overline{u'u'} + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \overline{u'v'} + \frac{\partial}{\partial p} \overline{u'\omega'} \right] \\ &\quad - \bar{v} \left[ \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \overline{u'v'} + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \overline{v'v'} + \frac{\partial}{\partial p} \overline{v'\omega'} \right] \\ &\quad \underbrace{\hspace{10em}}_{C(K_m, K_e)} \end{aligned} \quad (2.14)$$

Novamente através de algumas manipulações algébricas obtem-se a equação da energia cinética turbulenta:

$$\begin{aligned}
\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} Ke}_{(VKe)} = & - \underbrace{\frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} Ke - \frac{\bar{v}}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} Ke - \bar{\omega} \frac{\partial}{\partial p} Ke}_{(AKe)} \\
& - \underbrace{\frac{u'}{a \cos \varphi} \frac{\partial \phi'}{\partial \lambda} - \frac{v'}{a} \frac{\partial \phi'}{\partial \varphi}}_{C(Ke, Pe)} - \underbrace{\bar{F}_x u' - \bar{F}_y v'}_{De} \\
& - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \overline{uu'u'} - \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \varphi} \overline{vu'v'} - \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial p} \overline{uu'v'} \\
& - \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial p} \overline{vv'v'} - \frac{\partial}{\partial p} \overline{uu'\omega'} - \frac{\partial}{\partial p} \overline{vv'\omega'} \\
& \underbrace{\hspace{15em}}_{(FE)} \\
& + \bar{u} \left[ \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \overline{u'u'} + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \overline{u'v'} + \frac{\partial}{\partial p} \overline{u'\omega'} \right] \\
& + \bar{v} \left[ \frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} \overline{u'v'} + \frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \overline{v'v'} + \frac{\partial}{\partial p} \overline{v'\omega'} \right] \\
& \underbrace{\hspace{15em}}_{C(Km, Ke)}
\end{aligned} \tag{2.15}$$

Nas Equações (2.14) e (2.15), os termos associados à velocidade vertical  $\omega$ , serão omitidos para este cálculo de energética, pois por análise de escala  $\omega \cong 0.1 \text{ ms}^{-2}$  e quando associados aos termos de velocidade horizontal são desprezíveis.

Os termos (VKm) e (VKe) do lado esquerdo das Equações (2.14) e (2.15) representam as mudanças locais de energia cinética do estado básico e perturbação. Quanto aos termos do lado direito das Equações (2.14) e (2.15):

Os termos (AKm) e (AKe) representam advecção de energia cinética do estado básico e turbulenta, respectivamente. Esses termos não participam da manutenção ou dissipação de energia, quando integrados globalmente, esses termos serão nulos.

O termo (TM) da Equação (2.14), é um termo métrico que se deve essencialmente a esfericidade da terra, por análise de escala este termo é da ordem de  $\cong 10^{-4}$ , sendo desprezível quando comparados aos outros termos do balanço de energia.

Termos  $C(K_m, P_m)$  e  $C(K_e, P_e)$  mostram as conversões entre energia cinética do estado básico e a potencial disponível do estado básico e vice-versa através de movimentos verticais induzidos pelas circulações diretas e indiretas (células de Hadley e Ferrel); e conversões entre energia cinética da perturbação e a potencial disponível da perturbação através do escoamento vertical, podendo ser demonstrado da seguinte forma:

$$\frac{dK_e}{dt} \propto - \frac{R}{p} \overline{\omega'T'} \quad (2.16)$$

Onde o termo do lado esquerdo da equação acima significa a mudança local de energia cinética da perturbação, e o termo do lado direito da igualdade, energia potencial disponível turbulenta. Assim, com fluxo de calor ascendente, ou seja,  $\overline{\omega'T'} < 0$ , tem-se troca de energia potencial disponível para cinética. Para fluxo de calor descendente  $\overline{\omega'T'} > 0$ , tem-se troca de energia cinética para potencial disponível da perturbação.

Os termos  $(D_m)$  e  $(D_e)$  das Equações. (2.14) e (2.15) conceitualmente representam processos friccionais, mas quando computados como um resíduo como neste caso, estes também representam uma transferência de energia do estado básico e turbulento entre movimentos de escala de grade e subgrade devido a processos turbulentos não resolvíveis, esses termos são freqüentemente chamados termos de dissipação ou resíduo.

Os termos  $(F_E)$  da Equação (2.15), são fluxos externos  $(F_E)$  que aparecem devido ao estudo de manutenção de energia ser feito para uma região limitada, como América do Sul.

$C(K_m, K_e)$  mostra a divergência do fluxo horizontal e vertical de momentum. Esse termo aparece nas Equações (2.14) e (2.15) com sinal contrário, sendo portanto, o

responsável pela conversão de energia cinética do estado básico e a turbulenta. Um exemplo desta interação de energias pode ser melhor entendida enfocando a advecção do fluxo meridional de momentum, assim:

$$\frac{\partial}{\partial t} K_m \propto - \frac{\bar{u}}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \overline{u'v'}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} K_e \propto + \frac{\bar{u}}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \overline{u'v'}$$

Dessa forma, quando há divergência do fluxo meridional de momentum, tem-se  $\frac{\partial}{\partial t} K_m < 0$  e  $\frac{\partial}{\partial t} K_e > 0$ , então ocorre transformação de energia cinética do estado básico para energia cinética turbulenta (Instabilidade Barotrópica). O contrário é esperado com convergência do fluxo meridional de momentum.

Desta forma as Equações (2.14) e (2.15), podem ser escritas na forma simbólica da seguinte maneira:

$$VK_m = - AK_m - C(K_m, P_m) - D_m - C(K_m, K_e) \quad (2.17)$$

$$VK_e = - AK_e - C(K_e, P_e) - D_e - FE + C(K_m, K_e) \quad (2.18)$$

## CAPÍTULO 3

### DADOS E METODOLOGIA

#### 3.1 - Seleção de Dados

Os dados selecionados para o presente estudo são derivados da reanálise da base de dados do National Centers for Environmental Prediction (NCEP). Esses dados possuem distribuição global e resolução horizontal de 2,5 em latitude e longitude, maiores informações sobre essa base de dados podem ser encontradas em Kalnay *et al* (1996). Para o estudo da manutenção da corrente de jato a partir da circulações transversais, foram utilizados os dados médios mensais de altura geopotencial ( $z$ ), e as componentes zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ) do vento, para o período de inverno (JJA) de 1982 a 1994 para os níveis de 200 hPa e 850 hPa. Para a manutenção da corrente de jato através das trocas de energia cinética utilizou-se os dados diários de altura geopotencial ( $z$ ), componente zonal ( $u$ ) e meridional ( $v$ ) que são médias diárias de 4 horários do conjunto da reanálise, neste caso o período de estudo foi de seis anos, ou seja, três anos de El-Niño (1983, 1987, 1993) e três anos de La-Niña (1984, 1988, 1989) no nível de 200 hPa. A área de estudo se restringe a uma parte da América do Sul entre as latitudes de 20°S a 55°S e longitudes de 20°W a 90°W.

#### 3.2 - Ferramenta Utilizada

Todos os cálculos e a visualização gráfica dos dados foram obtidas através do **Software Grads** (Grid Analysis and Display System) (Doty, B.E., 1985). Esse “software” permite programar na forma de um “script”, podendo também ser utilizado para automatizar cálculos e visualizações complexas de vários passos.

### **3.3 - Metodologia**

A metodologia a ser utilizada neste trabalho encontra-se dividida em duas partes principais:

- Verificação da manutenção da corrente de jato a partir das circulações transversais;
- Manutenção da corrente de jato a partir das trocas de energia cinética.

#### **3.3.1 - Verificação da Manutenção da Corrente de Jato a partir das Circulações Transversais**

Como a ênfase do trabalho é para a manutenção da corrente de jato sobre a América do Sul, escolheu-se o período de inverno (JJA), visando uma melhor demonstração das circulações médias transversais em torno da corrente de jato, já que neste período a mesma se intensifica apresentando-se bem acentuada em algumas situações. Inicialmente as análises foram efetuadas considerando-se as médias mensais, porém os resultados não foram satisfatórios. A fim de diminuir a margem de erro, para que se pudesse obter uma visualização das circulações médias transversais em torno da corrente de jato, fez-se médias trimestrais dos meses de inverno.

Foi realizada uma análise climatológica média da corrente de jato calculando-se a média temporal e o desvio padrão do vento zonal para 10 níveis (1000-100 hPa) para o período de 1982-1994, juntamente com uma média interanual. Desta forma pode-se identificar a posição, variabilidade e intensidade das CJS e CJP. O próximo passo foi calcular os campos de ventos trimestrais dos meses de JJA do período citado acima, sobre a região da América do Sul (20-55°S, 20-90°W), para os níveis de 200 e 850 hPa, de maneira a avaliar a existência de circulações transversais contrárias em altos e baixos níveis.

Para finalizar esta etapa do trabalho, calculou-se o vento ageostrófico no mesmo campo de vento citado acima, e analisou-se as circulações médias transversais (direta e indireta) em torno da corrente de jato.

### **3.3.2 - Manutenção da Corrente de Jato a partir das Trocas de Energia Cinética**

O estudo da energética da corrente de jato ficará restrito a um período de seis anos, sendo três anos de El Niño e três de La Niña, destacando-se os possíveis contrastes entre estes dois fenômenos. Dentre os 13 anos inspecionados, os anos de 1983, 1987, 1993, foram anos em que ocorreu o fenômeno El Niño. Cada registro de ocorrência deste fenômeno possui peculiaridades. O El Niño de 1983 foi considerado na literatura como anômalo por sua intensidade, efeitos climatológicos globais, e também por seu desenvolvimento inicial anormal ( Rasmusson and Wallace, 1983). O El Niño de 1987 foi considerado moderado e se manifestou de modo anormal ao de 1983. O terceiro El Niño de 1990 a 1995 (Trenberth e Hoar, 1996), o qual consta na literatura como um El Niño bastante irregular , e o mais longo da história,. Para este estudo foi escolhido o ano de 1993 por apresentar uma corrente de jato mais intensa sobre a AS.

Sobre o fenômeno La Niña, sua caracterização é pelo resfriamento das águas do Pacífico leste, na região Equatorial (Halpert e Roppelowski, 1992). A ocorrência desse fenômeno foi registrado em 1984/1985 e em 1988/1989.

A fim de interpretar como é mantida a corrente de jato através das trocas de energia cinética, foi calculado e visualizado cada termo das Equações de energia cinética do estado básico e turbulento (2.14) e (2.15) sobre a América do Sul, os quais foram mostradas no capítulo 2 (subitem 3.2.2). Um exemplo disto pode ser observado no apêndice (A), para o ano de 1983 (El Niño), e no apêndice (B) para o ano de 1984 (La Niña). Depois conclui-se que uma melhor interpretação dos resultados seria feita, fazendo o cálculo de cada termo na área de estudo (20-55°S; 20-90°W), podendo-se desta forma observar a ordem de grandeza de cada um dos termos e seu grau de

importância na manutenção da corrente de jato para que se tivesse maior confiabilidade nos resultados.

Uma média zonal da componente zonal do vento ao longo de 10 níveis (100-1000hPa), para o período de El Niño e La Niña foi feita a fim de comprovar-se os resultados obtidos através da energética em termos de intensidade da corrente de jato durante os dois fenômenos, juntamente com a diferença entre os dois fenômenos, de forma a observar algum contraste relevante. Foi calculado uma média corrida de cinco dias do vento zonal, ao longo de cada dia do trimestre de JJA mostrando a sua variação no período de inverno para os dois fenômenos.

## **CAPÍTULO 4**

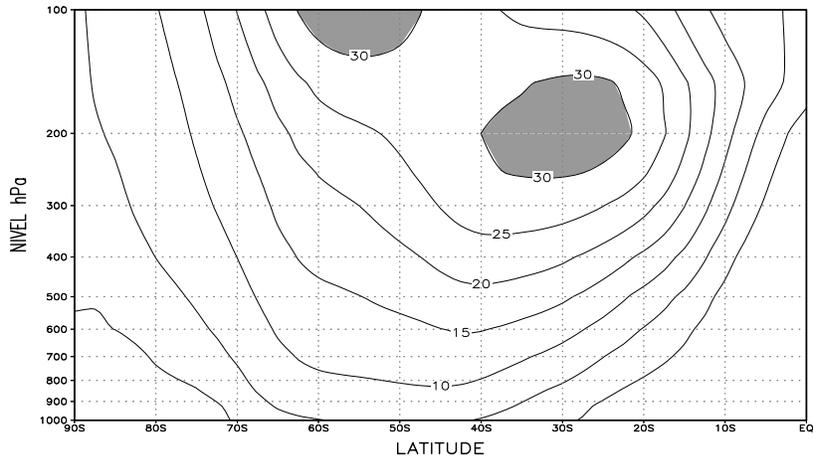
### **RESULTADOS**

Neste capítulo estão dispostos os resultados obtidos utilizando a metodologia descrita no Capítulo 3. Basicamente este capítulo se divide em duas seções 4.1 e 4.2. Na seção 4.1 serão mostrados e discutidos os resultados relativos a manutenção da corrente de jato através da circulação transversal utilizando o vento ageostrófico; na seção 4.2 serão apresentados os resultados relativos a manutenção da corrente de jato através das trocas de energia cinética.

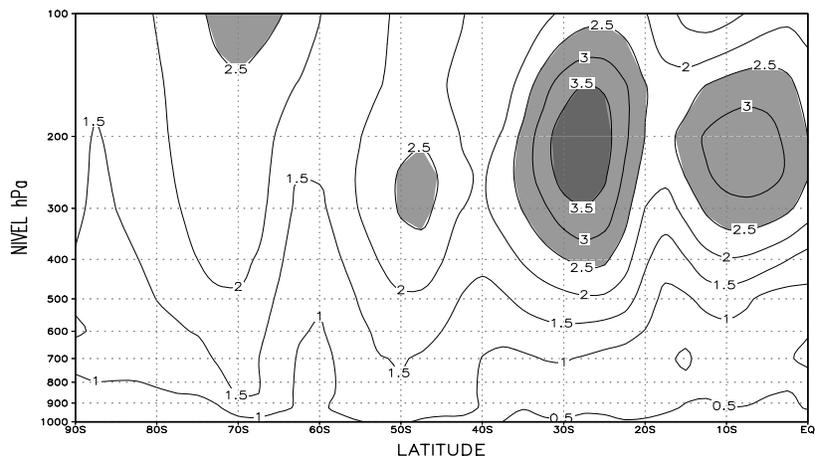
#### **4.1 – MANUTENÇÃO DA CORRENTE DE JATO UTILIZANDO O VENTO AGEOSTRÓFICO**

##### **4.1.1 -Análise Climatológica média da Corrente de Jato**

Preliminarmente realizou-se uma análise climatológica média da corrente de jato, a fim de se identificar a posição média (latitude e longitude) e variabilidade da intensidade da CJS e CJP. Os resultados podem ser observados nas Figura 4.1, confirmando a posição média descrita na literatura em geral para ambos os jatos. A Figura 4.1(a) apresenta a distribuição média zonal da componente zonal do vento entre as latitudes de 20-55°S ao longo de 10 níveis (1000-100 hPa), onde foi calculado uma média zonal do vento zonal no tempo no período de JJA de 1982-1994. Nota-se a existência de dois nvm com intensidade de aproximadamente 30m/s. Um encontra-se centrado em aproximadamente 30°S, ao nível de 200 hPa, correspondendo a CJS; o outro situa-se entre as latitudes de 50°S e 60°S, acima do nível de 200 hPa estendendo-se além de 100 hPa, tratando-se neste caso da CJP.



(a)



(b)

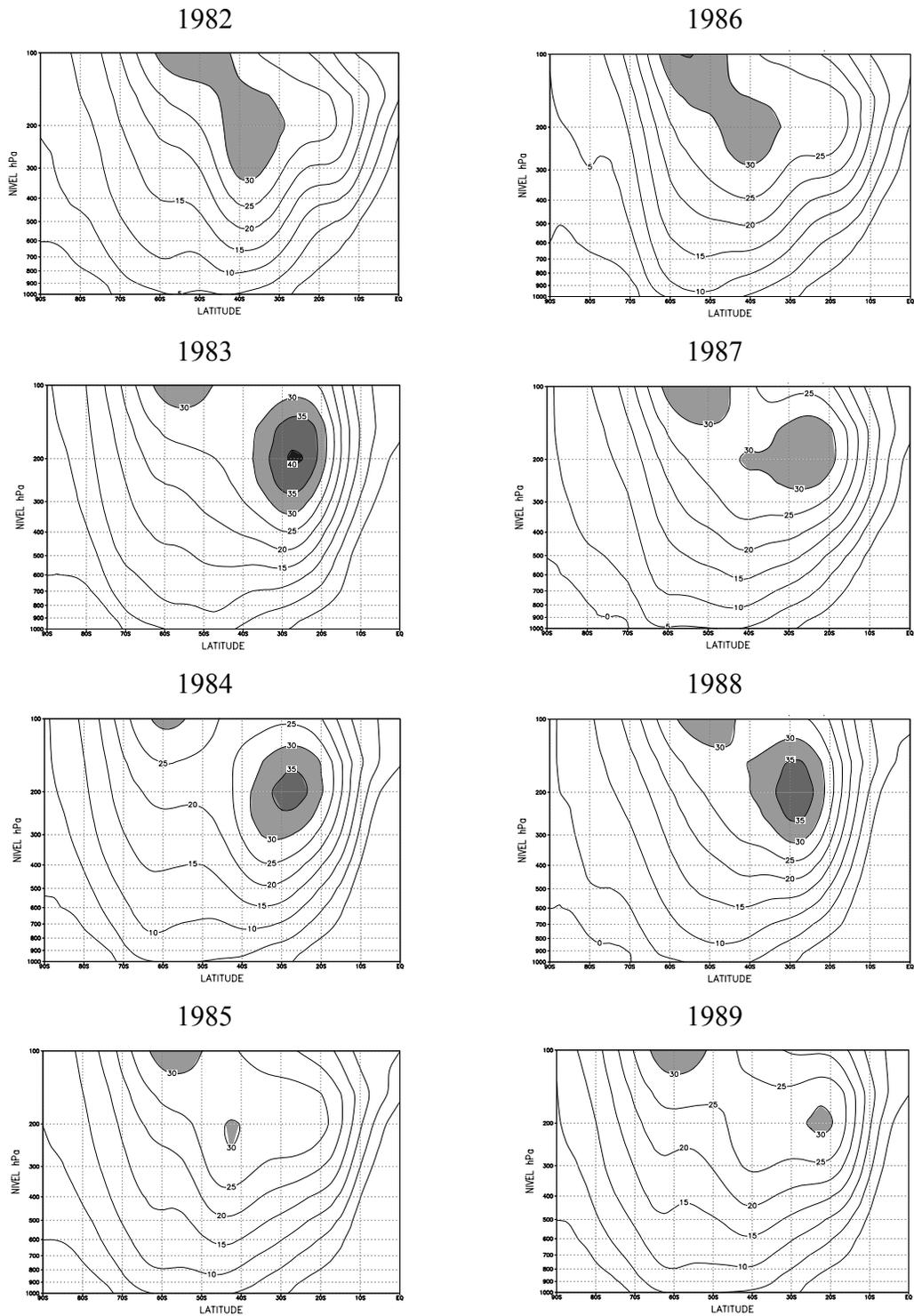
**Fig. 4.1** - (a) Distribuição média do vento zonal em intervalos de  $5 \text{ ms}^{-1}$ ; (b) Desvio padrão médio do vento zonal em intervalos de  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ .

O desvio padrão zonal da componente zonal do vento para o mesmo período é mostrado através da Figura 4.1(b). Pode-se notar que a CJS possui uma variabilidade acima de  $3.5 \text{ m/s}$ , portanto maior do que a CJP, que apresenta uma variabilidade de aproximadamente  $2 \text{ m/s}$ . Resultado este esperado, pois, a CJS localiza-se na região preferencial para as passagens de sistemas sinóticos de médias latitudes.

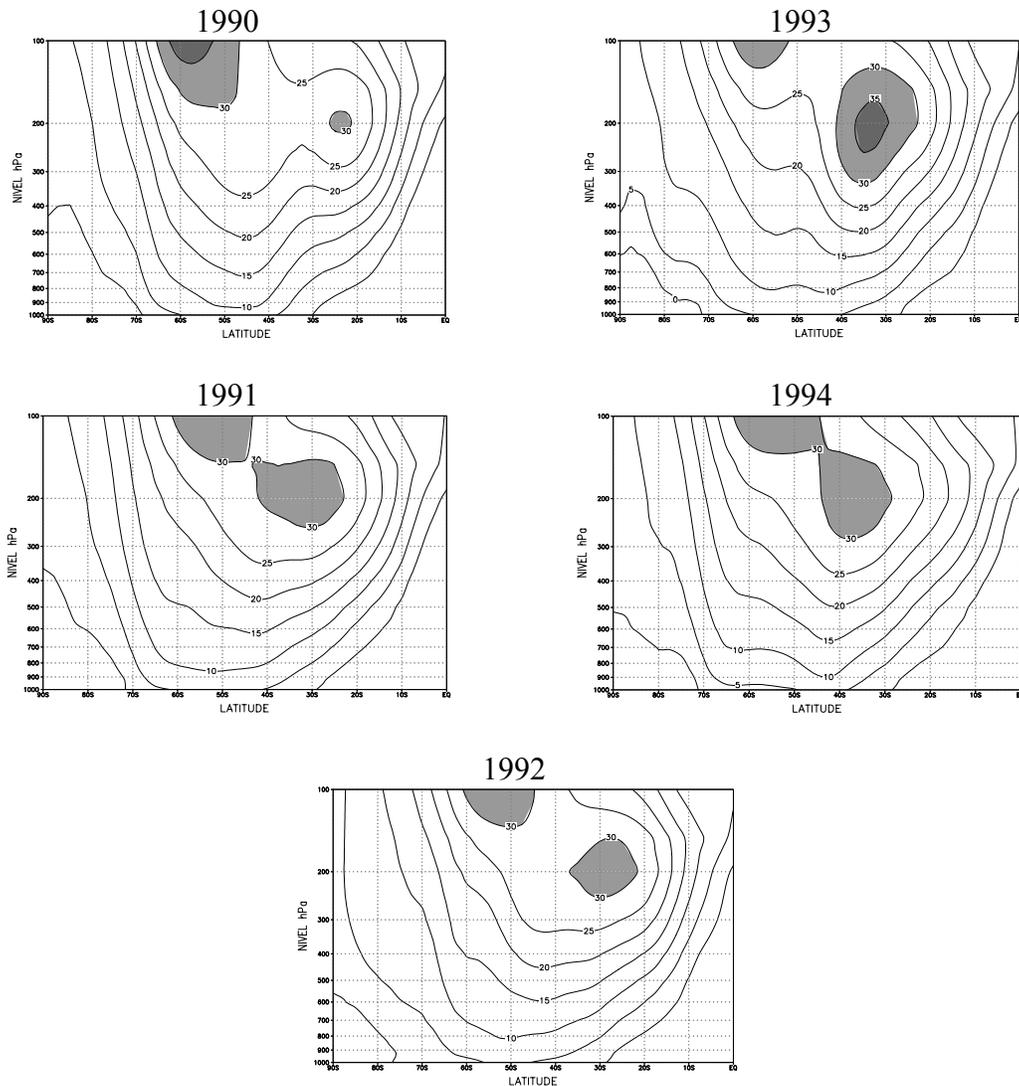
Uma variação interanual da corrente de jato em termos de posição e intensidade pode ser observada através da Figura 4.2. Dentre os treze anos estudados, nota-se para os anos de 1982, 1986 uma configuração do escoamento zonal semelhante. Esses dois anos marcaram o início do fenômeno El Niño 1982/83, 1986/87, assim como o ano de 1990 (1990-1994), que apresenta uma configuração mais deslocada ao Norte. Neste estágio a corrente de jato encontra-se em processo de intensificação (intensidade de aproximadamente 30 m/s e localização entre 30-40°S (1982, 1986) e entre 20-30°S (1990), devido ao aumento do gradiente de temperatura Norte-Sul que ocorre durante este período. Observa-se para os anos seguintes 1983,1987,1991, que o El Niño de 1983 apresentou-se de forma anômala por uma intensidade acima de 40 m/s (Rasmusson e Wallace, 1983). Os anos de 1987 e 1991 podem ser considerados como moderados e manifestaram-se de forma diferente ao ano de 1983, não ocorrendo intensificação a partir do estágio inicial (30 m/s), apenas apresenta uma configuração da CJS e CJP mais definida para o ano de 1987.

O período de El Niño estendido 1990 à 1995, consta na literatura como um El Niño bastante irregular, e o mais longo da história (Trenberth e Hoar, 1996). Observando-se estes anos de forma geral percebe-se que a intensidade da CJS não ultrapassa um pouco mais do que 30 m/s, a não ser no ano de 1993 que atinge um valor superior a 35 m/s. A CJP mostra-se mais intensa no ano de 1990 com um valor acima de 35 m/s. A posição da CJS varia entre 20-30°S e 30-40°S neste período, e a CJP aproximadamente entre 50-60°S, não apresentando grandes alterações.

Para os anos de 1984/85 e 1988/89 em que se registrou o fenômeno La Niña (Halpert e Roppelowski, 1992), observa-se em 1984 e 1988, período



**Fig. 4.2** - Distribuição interanual do vento zonal em intervalos de  $5 \text{ ms}^{-1}$  para o período de 1982-1994. (continua)



**Fig. 4.2 - Conclusão**

que representa o estágio inicial deste fenômeno, um perfil similar do escoamento zonal da CJS e CJP com intensidades acima de 35 m/s e 30 m/s respectivamente. A posição destas correntes varia de 20-30°S para a CJS, e de 50-60°S para a CJP. Nos anos subsequentes de 1985 e 1989 ocorre uma desintensificação da CJS e um deslocamento em direção ao Sul em 1985 e em direção ao Norte em 1989. Pode-se notar que a CJS em 1985 encontra-se localizada entre as latitudes de 40-50°S (onde geralmente encontra-se a CJP), esta situação pode ter ocorrido em função deste ano ter sido um ano atípico seco nas regiões Central e Sudeste da América do Sul. De uma forma geral,

pode-se certificar que a variabilidade da CJS é maior do que a da CJP como observado na Figura 4.1(b).

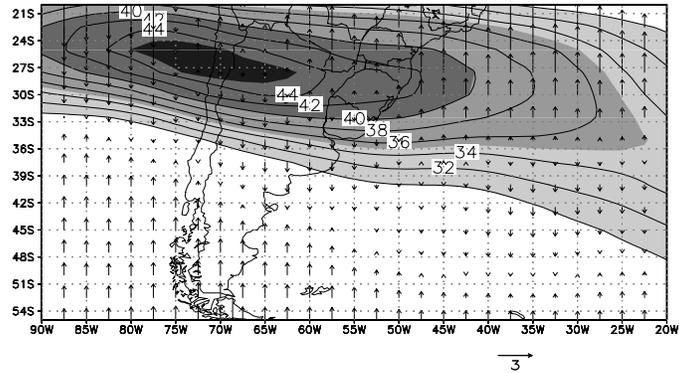
#### **4.1.2 –Circulações Transversais em Altos Níveis**

##### **4.1.2 a - El-Niño (1983,87,93)**

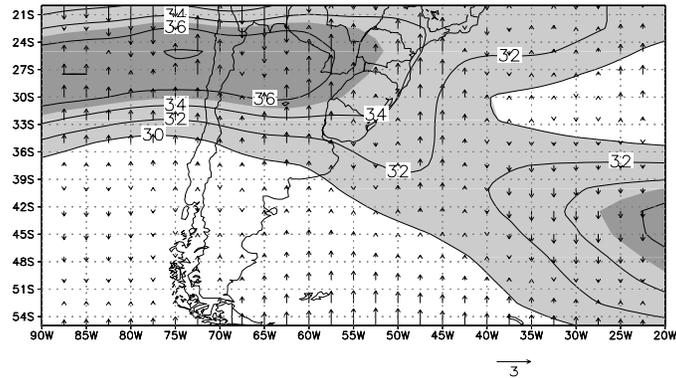
Para os três anos de El Niño estudados observa-se uma CJS bem pronunciada sobre a América do Sul (Figura 4.3) entre as latitudes de 20°S e 35°S, principalmente no ano de 1983, El Niño considerado um dos mais intensos do século. Nota-se pela análise desta Figura 4.3 que a intensidade da CJS é máxima no ano de 1983, com um nvm de 44 m/s, e um pouco menos intensa em 1987 e 1993, com nvm de 38 m/s. Em 1993, a CJS apresentou um comportamento diferenciado em relação aos outros anos, sendo verificado um alongamento do jato com dois núcleos, um núcleo secundário situado sobre a América do Sul entre 50°W e 60°W e o outro sobre o Pacífico no limite da área de estudo.

Nota-se na Figura 4.3 que as circulações médias transversais obtidas para os anos de 1983 e 1987 estão bastante coerentes com a definição teórica, embora em 1987 o nvm do jato encontre-se muito pequeno. Na entrada da corrente de jato, onde a aceleração da parcela de ar é positiva, a componente do vento ageostrófico é negativa, sendo portanto direcionada para o Sul, caracterizando uma circulação termicamente direta com trocas de energia de Pm para Km, com ascendência de ar quente e subsidência de ar frio. Na saída da corrente de jato, a componente do vento ageostrófico é positiva, e direcionada para o Norte, desacelerando assim a parcela de ar, tem-se neste caso uma circulação termicamente indireta com trocas de energia entre Km e Pm com ar quente subsidindo ao norte e ar frio ascendendo ao sul. É importante ressaltar que em 1983 (Figura 4.3 a) tem-se os valores máximos de vento ageostrófico em torno do nvm do jato durante este período, associado com a divergência corrente acima na entrada e corrente abaixo na

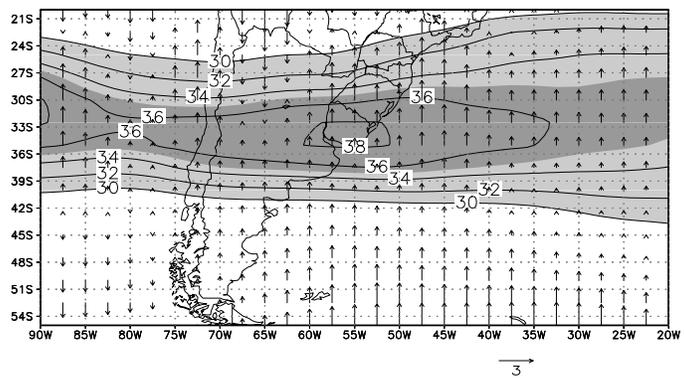
saída da corrente de jato, contribuindo para excessiva precipitação ocorrida na costa Peruana, regiões Sul e Sudeste durante este El Niño de 1983.



(a)



(b)



(c)

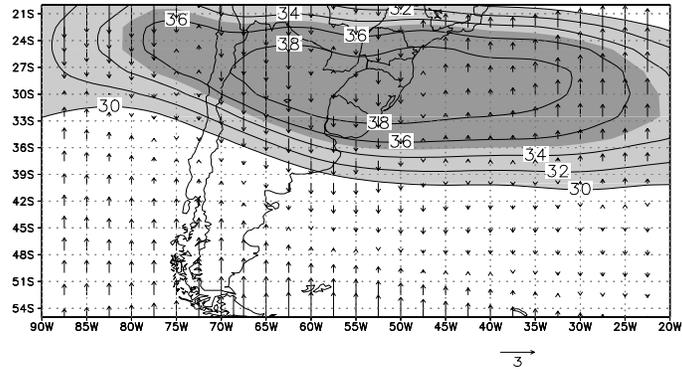
**Fig. 4.3** – Isotacas do vento zonal (linhas contínuas) em intervalos de 2 m/s e a componente meridional do vento ageostrófico (setas) no nível de 200 hPa para o período de El Niño (a) jja 1983; (b) jja de 1987; (c) jja de 1993.

No caso do ano de 1993 (Figura 4.3c), o centro secundário localizado sobre a AS, não mostra as circulações transversais bem definidas, sendo o vento ageostrófico direcionado para o Norte na entrada e saída da CJS. Pode-se observar ainda a saída do núcleo principal do jato que encontra-se sobre o Pacífico, ilustrando uma circulação termicamente indireta neste lado da corrente. A entrada desta corrente não pode ser analisada, pois encontra-se fora da região de estudo, conforme citado anteriormente.

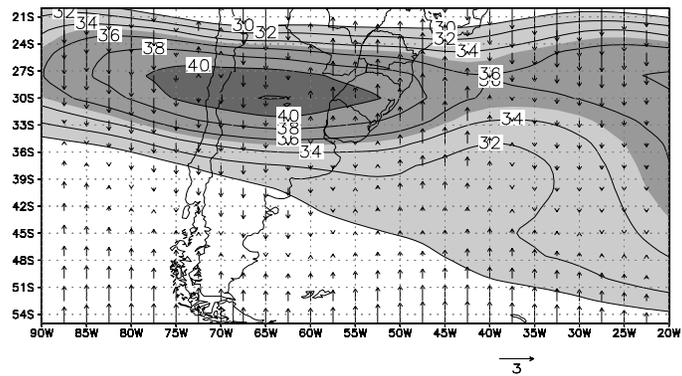
#### **4.1.2 b - La-Niña (1984,88,89)**

Para o fenômeno La-Niña, a CJS assim como em anos de El Niño permanece entre as latitudes de 20°S e 35°S (Figura 4.4), localizando-se sobre a América do Sul. O nvm encontra-se mais intenso no ano de 1988 com velocidade superior a 42 m/s, velocidade um pouco mais intensa do que o esperado neste fenômeno, mas não pode-se considerar uma situação anômala, porque neste caso diminui o gradiente meridional de temperatura no Pacífico, o que não quer dizer que não existam gradientes de temperatura intensos na atmosfera da AS, mesmo porque 1988 marcou o início do fenômeno La Niña, além ter sido um inverno com temperaturas abaixo da média (climanálise, 1988). O nvm menos intenso ocorreu em 1989 com velocidade de 33 m/s, neste a CJS está mais ao Norte.

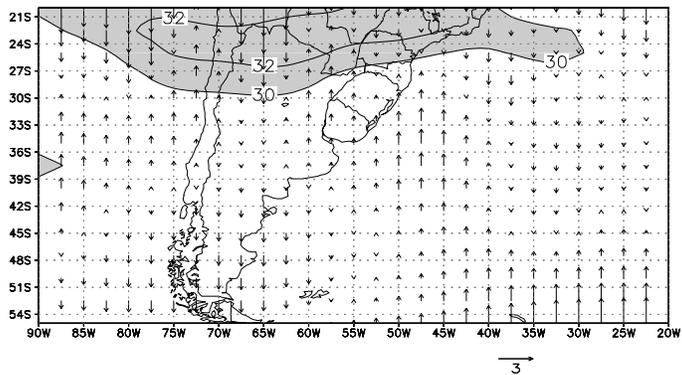
Observa-se ainda na Figura 4.4 que o vento ageostrófico mostra-se muito bem definido para 1984 e 1988, sendo direcionado na entrada da CJS para o Sul e na saída para o Norte, não diferenciando-se do período de El Niño, mostrando desta forma as circulações transversais direta com troca de energia entre (Pm⇒Km) e indireta (Km⇒Pm) como explicado para El Niño. Uma exceção ocorreu no ano de 1989, onde a circulação apresenta-se de forma meio indefinida, não mostrando de forma nítida a circulação transversal na saída do nvm, onde o vento ageostrófico deveria estar direcionado para o Norte, isto pode ter acontecido devido proximidade da CJS as latitudes em que a aproximação geostrófica muito válida (região equatorial).



(a)



(b)



(c)

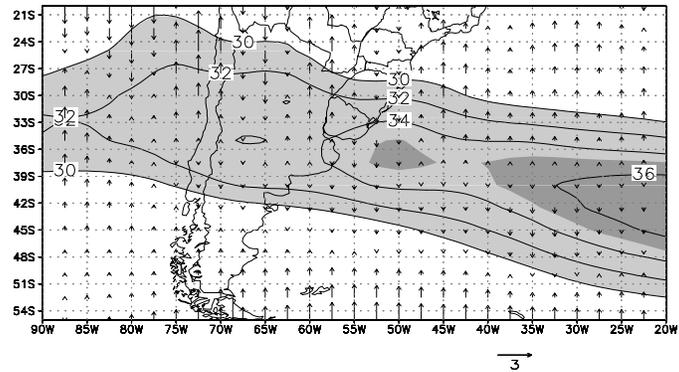
**Fig. 4.4** – Isotacas do vento zonal (linhas contínuas) em intervalos de 2 m/s e a componente meridional do vento ageostrófico (setas) no nível de 200 hPa para o período de La Niña (a) jja 1984; (b) jja de 1988; (c) jja de 1989.

#### 4.1.2 c - Outros Anos (1982, 85, 86, 90, 91, 92, 94)

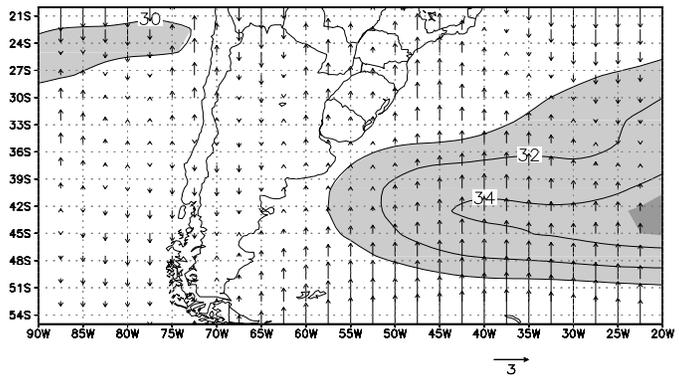
Nestes anos, nota-se através da Figura 4.5 que em alguns casos existe a CJS e CJP (1982, 90, 91, 92, 94), como também inexistente a CJS sobre a América do Sul em 1985. Um fato interessante pode ser observado nos anos de 1985-86 (Figura 4.5 b e c), o padrão de escoamento da CJS encontra-se mais deslocado para o Sul entre as latitudes de aproximadamente 30°S e 50°S, desaparecendo sobre a América do Sul em 1985 e encontrando-se sobre o Atlântico Sul, a leste do continente. E em 1986 localiza-se sobre o Sul da América do Sul, apresentando em ambos os casos um nvm de aproximadamente 34 m/s.

Nos anos de 1982, 90, 91, 92 (Figura 4.5 a, d, e, f) pode-se observar a presença da CJS sobre a América do Sul entre as latitudes de 20°S a 30°S, com nvm de 36 m/s. A CJP também surge sobre o Atlântico Sul entre as latitudes de 35°S e 50°S aproximadamente, com nvm de 36 m/s. Note que as circulações transversais para o ano de 1990, não se apresentam de acordo com o esperado, surgindo de forma indefinida na saída da CJS como no ano de 1989 do período de La Niña, podendo ser explicado pela proximidade desta corrente a latitudes em que a aproximação geostrófica não é válida.

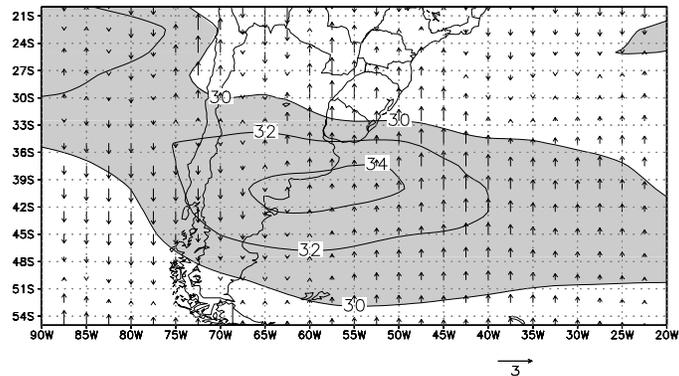
Um fato curioso pode ser observado no ano de 1994, onde a corrente de jato mostrou-se com um alongamento do jato com dois núcleos, um situado sobre o continente e o outro sobre o Atlântico Sul, diferenciando-se do comportamento do ano de 1993 descrito no período de El Niño que o alongamento da corrente de jato estava sobre o Pacífico oeste. Este alongamento pode ter ocorrido em função das isotacas, que foram traçadas pegando o mesmo valor de 34 m/s, juntando a CJS e a CJP como se fossem uma única corrente.



(a)

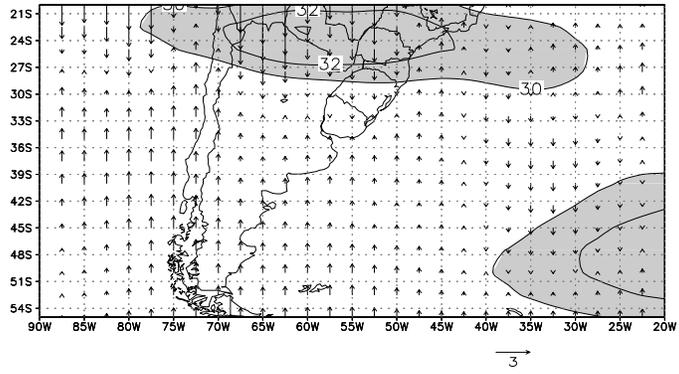


(b)

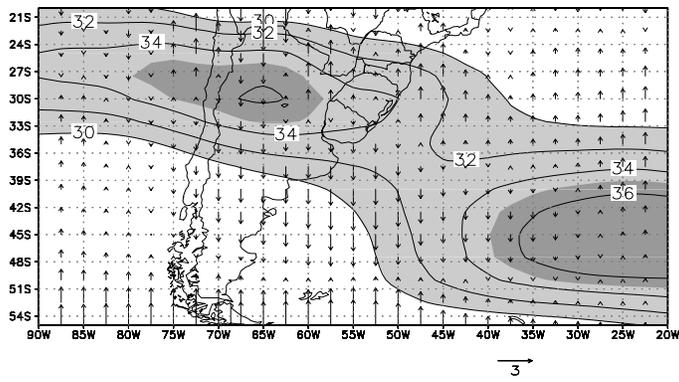


(c)

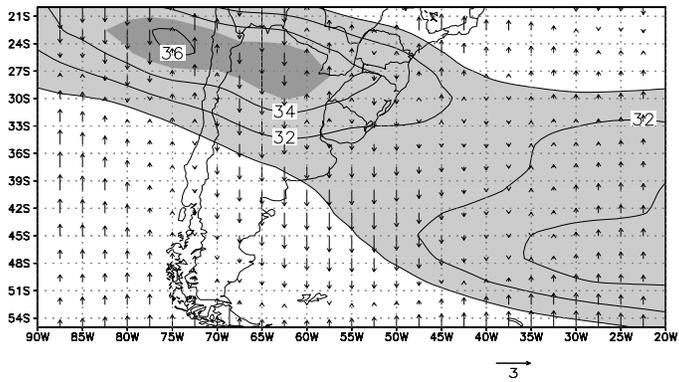
**Fig.4.5** - Isotacas do vento zonal (linhas contínuas) em intervalos de 2 m/s e a componente meridional do vento ageostrófico (setas) no nível de 200 hPa para os outros anos (a) JJA 1982; (b) JJA 1985; (c) JJA 1986; (d) JJA 1990; (e) JJA 1991; (f) JJA 1992;(g) JJA 1994. (continua)



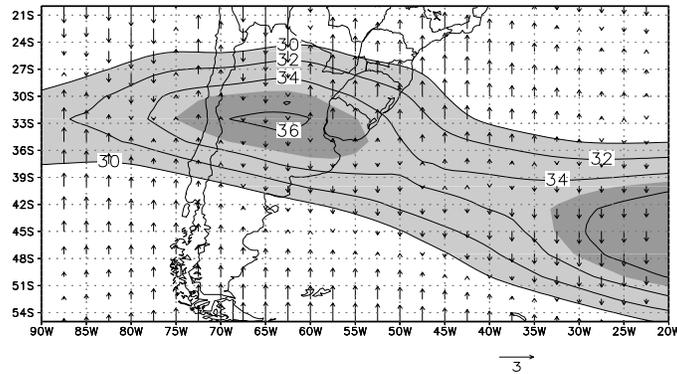
(d)



(e)



(f)



(g)

**Fig 4.5 - Conclusão**

As circulações transversais para este período (outros anos) apresentam-se de uma forma geral bem definidas em torno da CJS e CJP, embora os resultados tenham sido mais satisfatórios para El Niño e La Niña. Mais uma vez o padrão esperado de circulações é comprovado, ou seja na entrada do jato o vento ageostrófico está direcionado para o Sul da América do Sul e na saída para o Norte, definindo assim uma circulação termicamente direta ( $P_m \Rightarrow K_m$ ) na entrada do jato e indireta ( $K_m \Rightarrow P_m$ ) na saída.

De uma forma geral nota-se que para os anos de El-Niño a CJS encontrou-se bem mais intensa, principalmente no inverno de 1983 (período final de El Niño muito forte). Em anos de El Niño ocorre um aquecimento anômalo nas águas do Pacífico leste equatorial, aumentando assim nesta região a convecção e a liberação de calor latente, e em consequência a atmosfera é aquecida, aumentando portanto o gradiente de temperatura Norte-Sul que é o principal subsídio para a formação e intensificação corrente de jato. Nesses casos o padrão de circulações médias transversais mostrou-se bem coerentes com o padrão idealizado. Em anos de La Niña, a CJS encontrou-se um pouco menos intensa, neste caso o aquecimento tropical anômalo não existe, o que pode levar a um menor gradiente de temperatura Norte-Sul, e portanto jatos mais fracos. As circulações transversais durante este fenômeno mostraram-se menos nítidas do que o esperado. Para os outros anos, tem-se uma circulação transversal bem definida na entrada da CJS,

porém na saída nem sempre o padrão está coerente, nestes anos é observada a presença quase que permanente da CJP.

De uma forma geral conclui-se que a corrente de jato pode ser localmente mantida pelo balanço entre a energia cinética gerada pelo escoamento ageostrófico e a divergência do fluxo de energia tal como observado por Holopainem, (1978). As circulações transversais direta e indireta são responsáveis pelas conversões de energia potencial disponível para cinética ( $P_m \Rightarrow K_m$ ) na entrada da corrente de jato e pelas conversões de energia cinética para potencial disponível ( $K_m \Rightarrow P_m$ ) na saída da corrente de jato. Ressaltando ainda que o estudo dessa circulações deve evidenciar áreas de divergência-convergência tanto na alta como na baixa troposfera. Esses padrões, dependendo da energia disponível, podem gerar instabilidades que favoreçam o surgimento e a manutenção dos sistemas convectivos de mesoescala. Mas os resultados mostram, que alguns problemas de interpretação surgem com o uso das circulações transversais nas regiões de entrada e saída da corrente de jato no padrão de vento ageostrófico, como: a proximidade da CJS nas regiões em que a geostrofia não é válida, processos computacionais imperfeitos e, como sugerido por Blackburn (1985), o uso da definição de geostrofia usando o parâmetro de coriolis variável ou constante.

#### **4.1.3 - Circulações Transversais em Baixos Níveis**

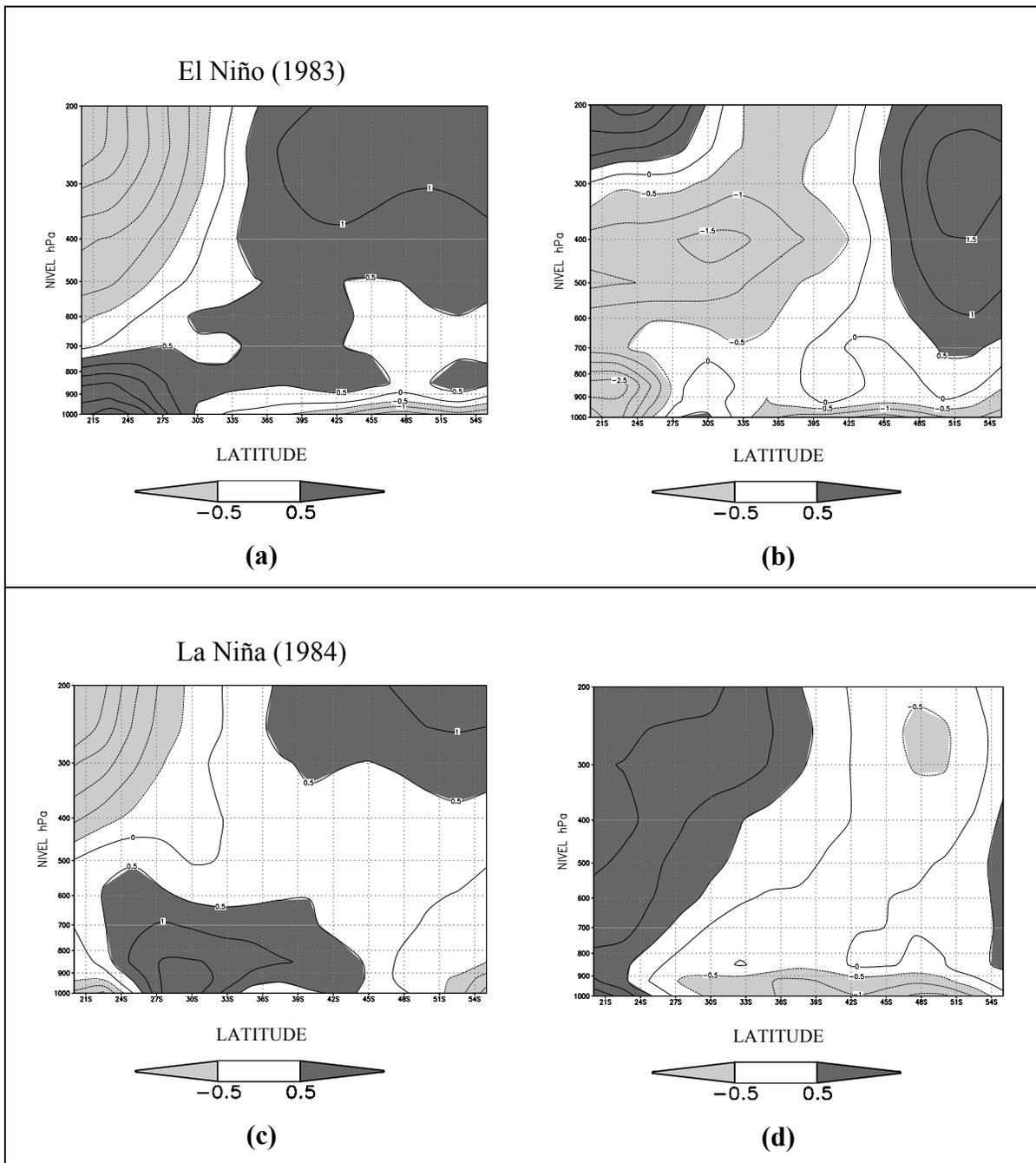
A descrição da circulação ageostrófica sugerida por Bjerknes e Holmboe (1944), implica em divergência (convergência) do campo de vento zonal no nível da corrente de jato acompanhada por convergência (divergência) do vento zonal na direção oposta em baixos níveis. Para observar essa situação foram confeccionadas seções verticais do vento ageostrófico.

A Figura 4.6 mostra a circulação transversal em uma seção vertical da CJS (entrada e saída) ao longo de nove níveis padrões entre 1000-200hPa. Este cálculo foi realizado

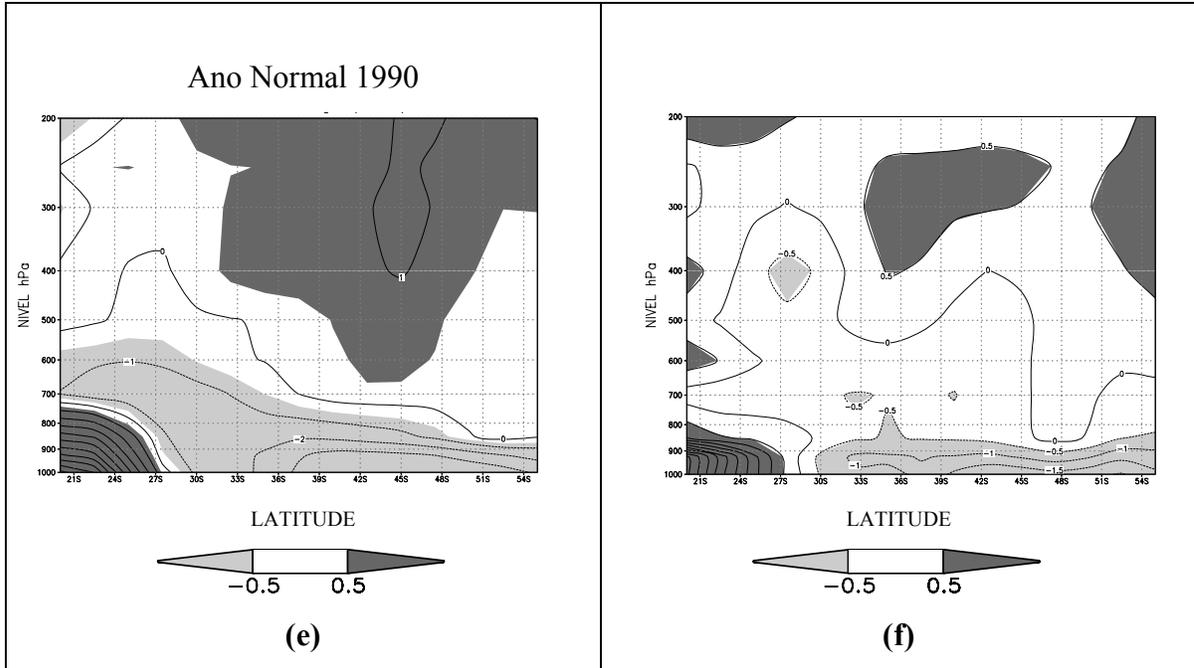
somente em torno da CJS, devido a sua localização sobre a área de interesse, América do Sul, para todo o período de estudo 1882-1994. Foi exemplificado para um ano de El Niño muito intenso (1983) (Figura 4.3a), um de La Niña bem representativo (1984) (Figura 4.4a) e outro normal (1990) (Figura 4.5 d) escolhido por não apresentar a circulação transversal bem definida na saída da CJS, assim pode-se avaliar com maior confiabilidade a circulação ageostrófica sugerida por Bjerknes e Holmboe (1944).

Entrada da CJS

Saída da CJS



**Fig.4.6** - Seções verticais de vag em intervalos de  $0.5 \text{ ms}^{-1}$  na CJS para entrada (a) e saída (b) no El Niño 1983; entrada (c) e saída (d) no La Niña 1984; entrada (e) e saída (f) em 1990. Isolinhas tracejadas; vag negativo, isolinhas sólidas; vag positivo em intervalos de  $0.5 \text{ ms}^{-1}$ . (continua)



**Fig.4.6 - Conclusão**

Para o El Niño de 1983, a CJS encontra-se centrada entre as latitudes de 20-30°S no nível de 200 hPa (ver Figura 4.3 a). Note que na entrada da CJS (corte vertical em 85°W), o vento ageostrófico é negativo do nível de 200 hPa até o nível de 700 hPa (Figura 4.6 a) sendo direcionado para o Sul como se constatou anteriormente. Em baixos níveis (1000-700 hPa), está circulação ageostrófica mostra-se invertida, ou seja, o vento ageostrófico neste caso está direcionado para o Norte. Na saída da CJS (Figura.4.6 b) o corte vertical foi feito na longitude de 60°W, tem-se valores positivos de vento ageostrófico entre os níveis de 200-300 hPa, sendo direcionado para o Norte, e abaixo do nível de 300 hPa observa-se que o vento ageostrófico é negativo, sendo neste caso direcionado para o Sul.

No ano de La Niña (1984) a CJS localiza-se aproximadamente entre as latitudes de 20-33°S no nível de 200 hPa (Figura.4.4a). Neste caso nota-se na entrada da CJS (corte em 80°W) (Figura.4.6c) que o vento ageostrófico apresenta-se com valores negativos até o nível de 500 hPa e valores positivos a partir deste nível até 1000 hPa com uma inclinação para o Sul (a partir de 24°S), ilustrando circulações ageostróficas contrárias

para o Sul e para o Norte. O outro corte vertical foi feito em 33°W (Figura 4.6 d) na saída da CJS, neste caso só se consegue observar uma circulação inversa em baixos níveis, abaixo de 900 hPa (a partir de 27°S) indo até 1000 hPa, portanto vento ageostrófico apresenta-se direcionado para o Sul até o nível de 900 hPa (que já é considerado baixos níveis). Para este ano as circulações transversais mostram-se contrárias para baixos e altos níveis, porém um pouco mais deslocadas em direção ao Sul.

Em 1990, a CJS encontra-se centrada entre as latitudes de 20-30°S (ver Figura.4.5 d), o corte vertical foi feito em 70°W, entrada da CJS (Figura.4.6 e), o vento ageostrófico do nível de 200 até aproximadamente 700 hPa mostra-se negativo, porém um pouco deslocado em direção ao Norte, a partir deste nível até 1000 hPa o vento ageostrófico é positivo (entre as latitudes de 20-28°S). Na saída da CJS, onde foi feito um corte vertical em 45°W (Figura.4.6 f), as circulações contrárias em baixos e altos níveis não aparecem de forma definida, mostrando valores de vento ageostrófico positivos e negativos ao longo de cada nível e em latitudes diferentes. Mas o resultado está coerente com o cálculo de vento ageostrófico em torno da CJS no nível de 200 hPa (Figura.4.5 d), onde o resultado também não foi representativo na saída da CJS.

De uma forma geral esses resultados estão de acordo com a descrição ageostrófica sugerida por Bjerknes e Holmboe (1944), mostrando-se de forma mais nítida em 1983, o que não se pode concluir, até mesmo pela quantidade de anos investigados, é a existência de um limite padrão entre altos e baixos níveis, em que ocorre esta circulação em direção oposta. Vale salientar ainda que em baixos níveis existe uma imprecisão maior no vento ageostrófico, pois nestes níveis a aproximação geostrófica não é válida devido a força de atrito, contribuindo para um  $v_{ag} > v_g$ . Desta forma erros no cálculo do vento geostrófico levam a um grande erro no cálculo do vento ageostrófico. Neste estudo utilizou-se a expressão diagnostica do balanço geostrófico, já que trabalhou-se com um período de tempo trimestral. Embora atualmente se façam aplicações prognósticas complicadas devido a aceleração ( a qual deve ser uma medida precisa)

que é dada por uma pequena diferença entre a força de coriolis e o gradiente de pressão. Assim um pequeno erro na medida da velocidade ou gradiente de pressão levam a um considerável erro na estimativa da aceleração. Uma conveniente medida da magnitude da aceleração, quando se utiliza uma análise prognostica é feita através de um número adimensional chamado número de Rossby.

## 4.2 – MANUTENÇÃO DA CORRENTE DE JATO ATRAVÉS DAS TROCAS DE ENERGIA CINÉTICA

A corrente de jato em média, são regiões de forte concentração de energia cinética. O balanço médio de energia cinética, foi obtido por uma média na área de estudo (20-55°S, 20-90°W), onde foi observado e analisado os ventos de oeste no nível de 200 hPa, para o período de inverno, utilizando três anos que se constatou El Niño e três de La Niña. Uma visão média da variação do ciclo de energia cinética na corrente de jato para cada um dos anos de El Niño e de La Niña pode ser observada através das tabelas (4.1 e 4.2), e melhor demonstradas de forma simbólica na Figura. 4.8

**TABELA 4.1 – BALANÇO MÉDIO DE ENERGIA CINÉTICA DO ESTADO BÁSICO (Km)**

PERÍODO	A <sub>km</sub> (10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> )	C(Km,Pm) (10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> )	C(Km,Ke) (10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> )	Km (m <sup>2</sup> s <sup>-2</sup> )	Dm (10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> )
JJA/83	-0.6805	-15.3207	-0.7053	527.464	-16.9205
JJA/87	-2.7278	-5.9267	1.7226	481.204	-7.2775
JJA/93	-2.5142	-9.1517	4.5715	474.015	-7.8347
MÉDIA	-1.9742	-10.1330	1.8629	494.228	-10.6776
JJA/84	-6.6878	-1.0668	-1.9872	459.169	-9.9861
JJA/88	-9.9490	0.9742	-3.6154	506.961	-13.0671
JJA/89	-0.4186	-6.6299	2.1076	374.455	-4.9304
MÉDIA	-5.6851	-2.2508	-1.1650	446.862	-9.3278

**TABELA 4.2 - BALANÇO MÉDIO DE ENERGIA CINÉTICA TURBULENTA (Ke)**

PERÍODO	FE ( $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ )	Ake ( $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ )	C(Ke,Pe) ( $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ )	C(Ke,Km) ( $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ )	Ke ( $\text{m}^2\text{s}^{-2}$ )	De ( $10^{-4} \text{ m}^2\text{s}^{-3}$ )
JJA/83	0.3567	-0.4961	1.6772	0.7053	159.306	2.2431
JJA/87	2.9903	-0.2092	4.1605	-1.7226	169.002	5.219
JJA/93	5.0090	2.0850	-0.2817	-4.5715	170.068	2.2327
MÉDIA	2.7826	0.4599	1.8520	-1.8629	166.125	3.2316
JJA/84	-0.4876	-0.1625	-1.6884	1.9872	144.92	3.0255
JJA/88	-2.1420	-1.1298	3.6149	3.6154	170.583	3.9585
JJA/89	3.1478	0.4332	1.4063	-2.1076	138.089	2.8797
MÉDIA	0.1727	-0.2864	2.2365	1.1650	151.197	3.2979

#### 4.2.1 – El Niño

A energia esteve mais concentrada nos termos do estado básico do que nos termos turbulentos. De uma forma geral houve uma constante conversão de energia cinética turbulenta para cinética do estado básico ( $Ke \Rightarrow Km$ ), a não ser para o caso do ano de 1983, que ocorreu o contrário. Este caso pode ser explicado pela grande quantidade de energia cinética do estado básico armazenada atingindo  $527 \text{ m}^2\text{s}^{-2}$ , mais da metade desta energia pode ter ocorrido em associação com a CJS mais intensa encontrada sobre a América do Sul durante o estudo (ver Figura. 4.4 b). Km pode ser produzido ou destruído com movimentos na atmosfera (ou oceano) a favor ou contra a força da gravidade. Note que para todos anos houve uma contínua troca de energia cinética do estado básico para potencial disponível ( $Km \Rightarrow Pm$ ), resultado este coerente, já que a região de estudo é compreendida entre as latitudes de 20-55°S, essencialmente dominada pela célula de Ferrel. No item anterior, constatou-se através das circulações

transversais que este tipo de troca de energia ocorre na saída da corrente de jato, mas para o caso deste estudo, a corrente de jato é tratada como um todo, já que a energia é calculada em uma determinada área, dominando assim os movimentos forçados pela subsidência de ar quente e ascensão de ar frio através da célula de Ferrel.

A distribuição latitudinal de radiação líquida incidente em combinação com a troca de energia entre a terra e atmosfera e a perda de energia para o espaço resulta em uma média excedente de calor em baixas latitudes e um déficit em altas latitudes, gerando um gradiente de temperatura entre o pólo e o equador. Esse gradiente de temperatura gera energia potencial disponível do estado básico ( $P_m$ ), a qual pode ser diretamente convertida em energia cinética do estado básico ( $K_m$ ) através dos movimentos meridionais. Assim uma conversão de  $P_m$  para  $K_m$  ocorre na célula de Hadley de baixas latitudes, e a conversão de  $K_m$  para  $P_m$  ocorre na célula de Ferrel (Palmén e Newton, 1969). Para que a taxa de conversão negativa ou positiva seja dominante, vai depender do aquecimento meridional na atmosfera e da importância de processos turbulentos. Segundo Holopainen (1965), no inverno espera-se que a conversão de  $P_m$  para  $K_m$  seja dominante devido a influência da circulação de Hadley, embora no verão este tipo de conversão não seja tão importante para o balanço de energia cinética. A grande transformação de energia cinética não resulta em correspondente grande variação local de energia cinética devido a dois processos adicionais, transporte horizontal de calor e dissipação.

Há uma contínua perda friccional de energia cinética do estado básico ( $D_m$ ). Valores negativos do termo de dissipação representam mudanças de energia de escala de grade para escala de subgrade e uma perda friccional da viscosidade e dissipação de energia. Para a energia cinética turbulenta, os valores positivos do termo de dissipação representam processos de subgrade como uma fonte de energia. Isto pode ocorrer frequentemente quando o termo de dissipação é calculado como um resíduo, como é o caso. Dados e processos computacionais imperfeitos são fatores responsáveis por estes valores positivos.

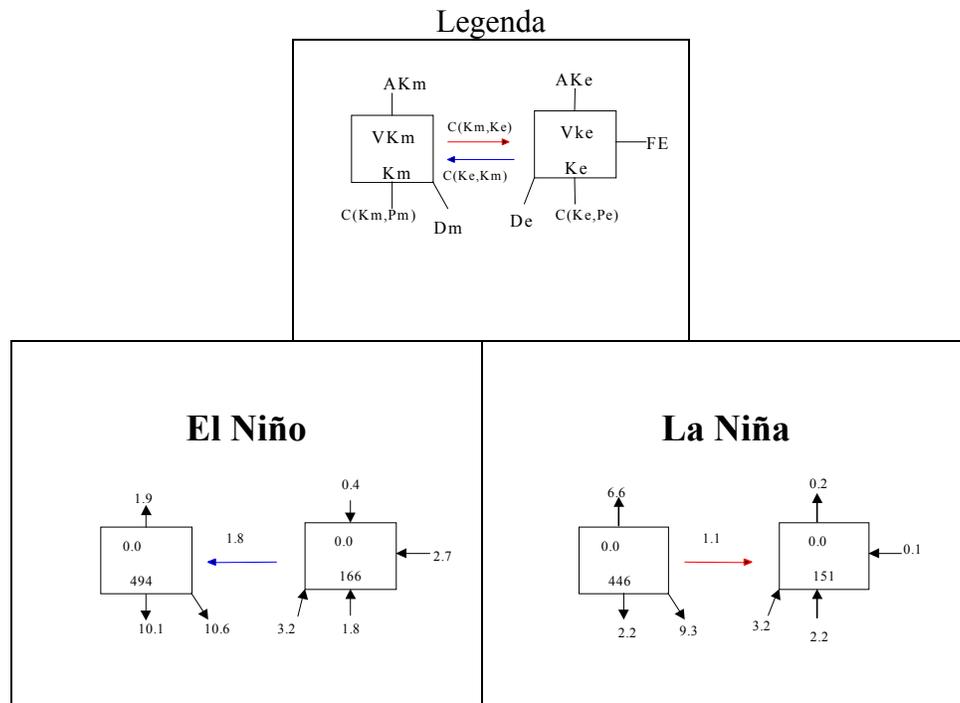
No geral as trocas de energia entre energia cinética turbulenta e potencial disponível turbulenta se deram no sentido desta última para a primeira ( $Pe \Rightarrow Ke$ ), devido a ascensão de ar quente e subsidência de ar frio. Esta troca de energia é determinada pelo produto do transporte turbulento de calor e o gradiente médio de temperatura na direção meridional. O inverso ocorreu no ano de 1993, quando predominou a circulação indireta.  $Pe$  pode ser gerado diretamente como um resultado da liberação de calor latente através da convecção do fluxo de calor turbulento e pelo fluxo de calor sensível. Um exemplo desta geração, através do fluxo de calor sensível, seria o estado inicial determinado por uma distribuição média meridional de temperatura, regiões oceânicas atuam como fontes de calor e regiões continentais como relativos sumidouros de calor durante o inverno, embora a distribuição oposta de fontes e sumidouros caracterizem a estação de verão, isto geraria  $Pe$ .

Os termos de advecção de energia cinética do estado básico ( $AK_m$ ) em média são negativos e os da perturbação positivos ( $AKe$ ) durante este período (ver tabela 4.1 e 4.2), indicando uma diminuição na variação local de energia cinética do estado básico e um aumento na variação local de energia cinética da perturbação. De todos anos inspecionados, o ano de 1993 pode ser citado como uma exceção, pois o termo ( $AKe$ ) possui um valor máximo na ordem de  $2 \text{ m}^2\text{s}^{-3}$  (ver Figura. 4.8) e positivo significando aumento na variação local de energia cinética turbulenta.

Durante todo o período  $Ke$  recebeu energia através dos fluxos externos ( $FE$ ), esse termo existe essencialmente por se tratar de uma região limitada (América do Sul), e pode ser a causa de um contrabalanço na manutenção de energia, já que se trata de um processo externo a região de estudo. O reconhecimento de formas adicionais de energia é de grande importância para investigar mais detalhadamente o ciclo de energia. Quando um complicado processo físico afeta várias formas de energia, nem sempre é possível definir a taxa pela qual uma forma é convertida em outra por este processo. Um exemplo disto, é que neste estudo a energética está sendo investigada somente para o nível de 200 hPa, alguns processos físicos podem estar acontecendo na vizinhança deste

nível, e não estão sendo levados em consideração podendo afetar o ciclo de energia. Observa-se que no ano de 1983, está ocorrendo uma contínua perda de  $K_m$ , para  $P_m$  e  $K_e$ , e tem-se uma grande quantidade de  $K_m$  armazenada, esta energia está sendo gerada por algum processo desconhecido aos cálculos que foram realizados, assim como um contínuo ganho de  $K_e$  que acontece durante este ano.

Pode-se observar na Figura 4.7, que em anos em que o fenômeno El Niño esteve presente, a corrente de jato em média se manteve intensa por uma troca de energia potencial turbulenta para cinética turbulenta ( $Pe \Rightarrow Ke$ ) através de movimentos verticais, seguida de uma troca de energia cinética turbulenta para cinética do estado básico ( $Ke \Rightarrow Km$ ), e ainda uma troca de energia cinética do estado básico para potencial do estado básico ( $Km \Rightarrow Pm$ ), devido a movimentos forçados pela circulação de Ferrel.



**Fig. 4.7** – Componentes do estado básico e turbulento do balanço de energia cinética médio. Lado esquerdo, fenômeno El Niño; Lado direito, fenômeno La Niña. Unidades: caixas:  $m^2s^{-2}$ , conversões:  $m^2s^{-3}$ .

#### 4.2.2 - La Niña

Neste período a energia esteve mais concentrada nos termos turbulentos do que no estado básico. Houve uma significativa troca de energia cinética do estado básico para cinética da perturbação ( $K_m \Rightarrow K_e$ ) (Instabilidade Barotrópica), a não ser para o ano de 1989 em que a troca se deu no sentido desta última para a primeira nos termos turbulentos. A energia cinética do estado básico e turbulenta, é mais intensa para este período no ano de 1988, com o valor de 506 e 170  $m^2s^{-2}$  respectivamente. Este resultado pode ser explicado devido ao intenso inverno que ocorreu neste ano (climanálise, 1988), contribuindo para um aumento no gradiente Norte-Sul de temperatura na região da América do Sul. Observa-se, que para anos de 1984 e 1989, houve uma contínua troca de energia cinética para potencial disponível do estado básico ( $K_m \Rightarrow P_m$ ) não se diferenciando do padrão anterior, que foi dominado pela circulação indireta da célula de Ferrel. O ano de 1988 foi uma exceção, sendo dominado neste caso por circulação direta da célula de Hadley.

Observe que não houve uma diferença nos processos dissipativos em relação aos dois fenômenos em questão, ou seja, tem-se uma perda de energia cinética do estado básico por processos friccionais e um ganho através deste mesmo processo como fonte de energia.

No geral houve uma contínua conversão de energia potencial para cinética turbulenta ( $P_e \Rightarrow K_e$ ), devido aos movimentos verticais de ascensão de ar quente e subsidência de ar frio. Neste caso o ano de 1984 manifestou-se de forma contrária aos outros anos, apresentando uma perda de energia cinética da perturbação através da energia potencial turbulenta.

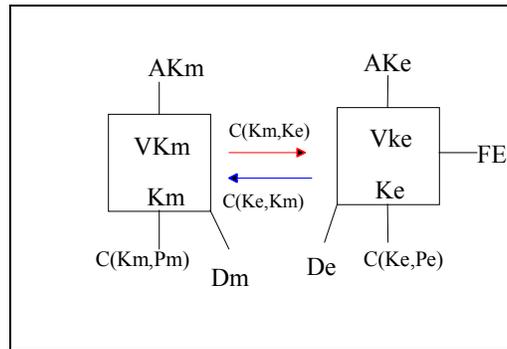
Em média os termos de ( $AK_m$ ) e ( $AK_e$ ) são negativos significando uma diminuição na variação local de energia cinética do estado básico e turbulento, mas também apresenta

uma exceção no ano de 1989, observando-se um aumento na variação local de energia cinética turbulenta, devido ao termo ( $VKe$ ) positivo, como observado para o período de El Niño.

Em praticamente todos os anos  $Ke$  perde energia através do fluxos externos ( $FE$ ), diferenciando-se do período de El Niño, a não ser o ano de 1989, em que ocorre um ganho de  $Ke$  através desses fluxos.

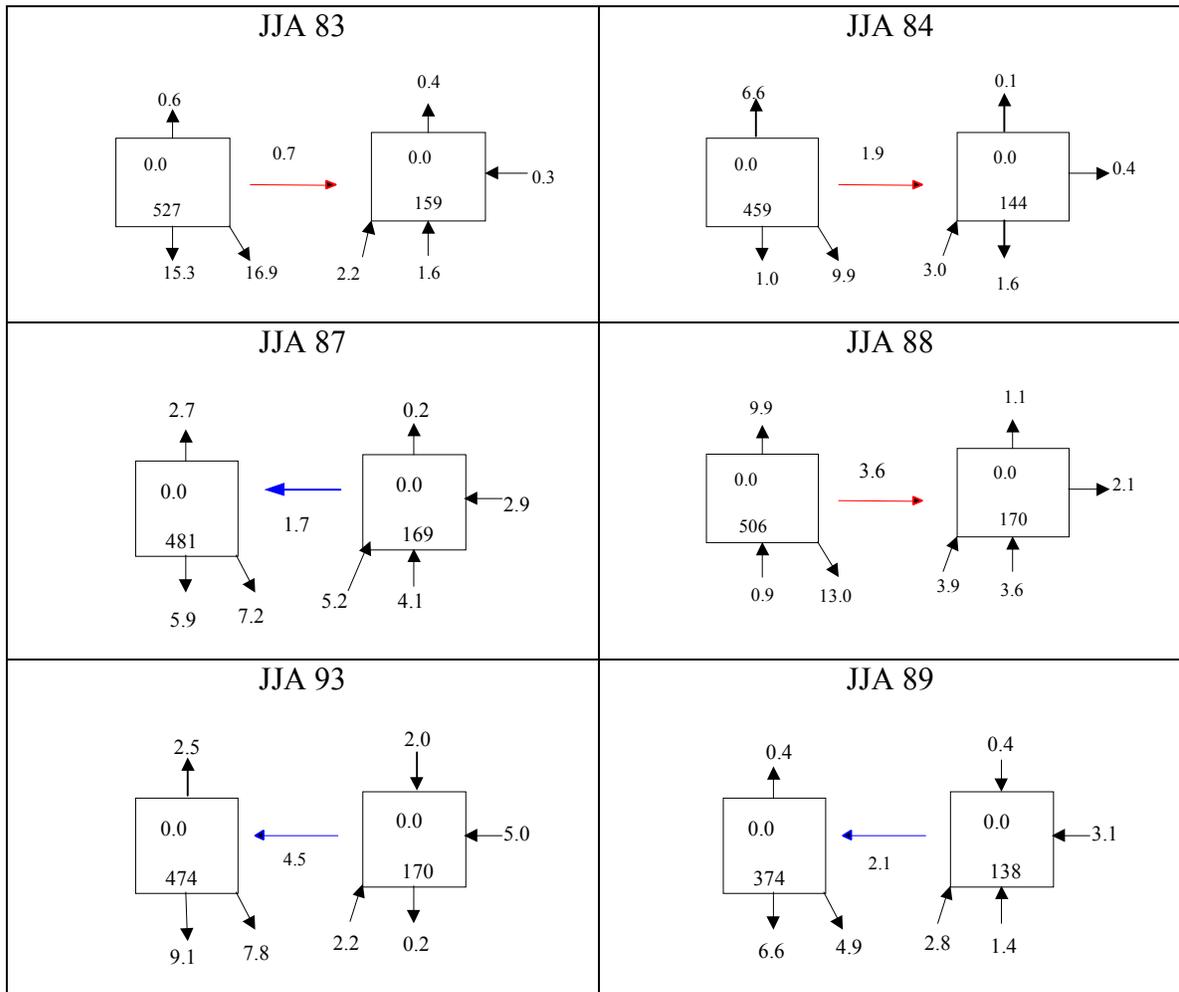
Para o período de La Niña (ver Figura 4.7) a corrente de jato em média encontra-se perdendo energia cinética do estado básico para os movimentos meridionais forçados pela célula de Ferrel ( $Km \Rightarrow Pm$ ) e para os distúrbios baroclinicos ( $Km \Rightarrow Ke$ ), precedida de uma troca de energia potencial disponível turbulenta para cinética turbulenta ( $Pe \Rightarrow Ke$ ) através de movimentos verticais, desintensificando desta forma a corrente de jato.

### Legenda



EL NIÑO

LA NIÑA



**Fig. 4.8** - Componentes do estado básico e turbulento do balanço de energia cinética.

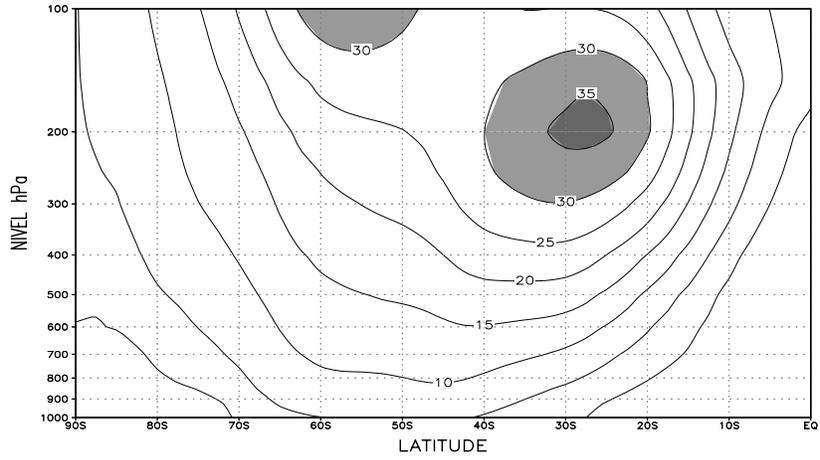
Lado esquerdo, trocas de energia ocorridas durante o fenômeno El Niño;

lado direito, trocas de energia ocorridas para o fenômeno La Niña.

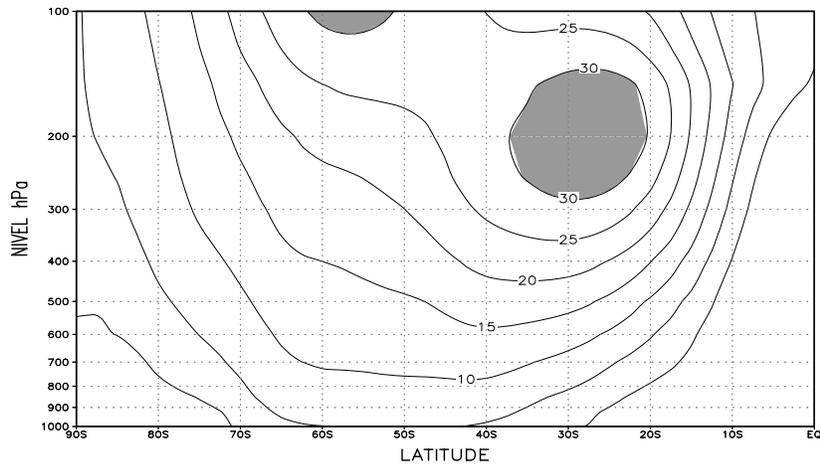
Unidades: Caixas:  $m^2s^{-2}$ , conversões:  $m^2s^{-3}$ .

### 4.2.3 – Contrastes Climatológicos para El Niño e La Niña

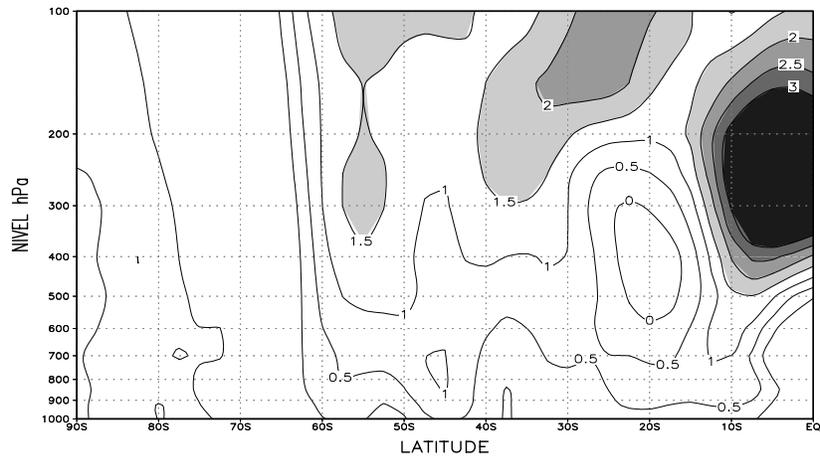
Através de uma seção altura versus latitude do campo de vento zonal (Figura.4.9), em uma média zonal de 20°W a 90°W, nota-se que em anos de El-Niño a CJS apresenta-se mais intensa do que em anos de La-Niña, como constatou-se através do estudo de energética. Pode-se observar na Figura.4.9(a), que a CJS apresenta uma intensidade máxima de 35 m/s, localizando-se aproximadamente entre as latitudes de 25°S e 35°S no nível de 200 hPa. Já na Figura. 4.9(b) anos de La Niña, a CJS encontra-se menos intensa, apresentando velocidade um pouco acima de 32.5 m/s e localizando-se entre as latitudes de 20°S e 40°S, estendendo-se abaixo e acima do nível de 200 hPa. A CJP não apresenta grandes contrastes, para os dois casos ela apresenta uma velocidade de 30 m/s, mostrando apenas uma pequena variação na altura. Na Figura.4.9(c) é mostrada a diferença em relação ao campo de vento zonal para El Niña e La Niña, mostrando exatamente o contraste na circulação durante estes dois períodos. Na região equatorial, entre os níveis de 200 e 300 hPa, encontra-se a maior diferença durante estes dois fenômenos ( $\geq 5$  m/s), a região da CJS apresenta uma diferença de  $\cong 2$  m/s. Vale salientar que a estrutura do vento zonal tem implicações para a propagação de ondas semi-estacionárias verticalmente, estas ondas estão confinadas no hemisfério de inverno, já que estas não podem se propagar verticalmente quando os ventos são de leste (Charney e Drazin, 1961).



(a)



(b)



(c)

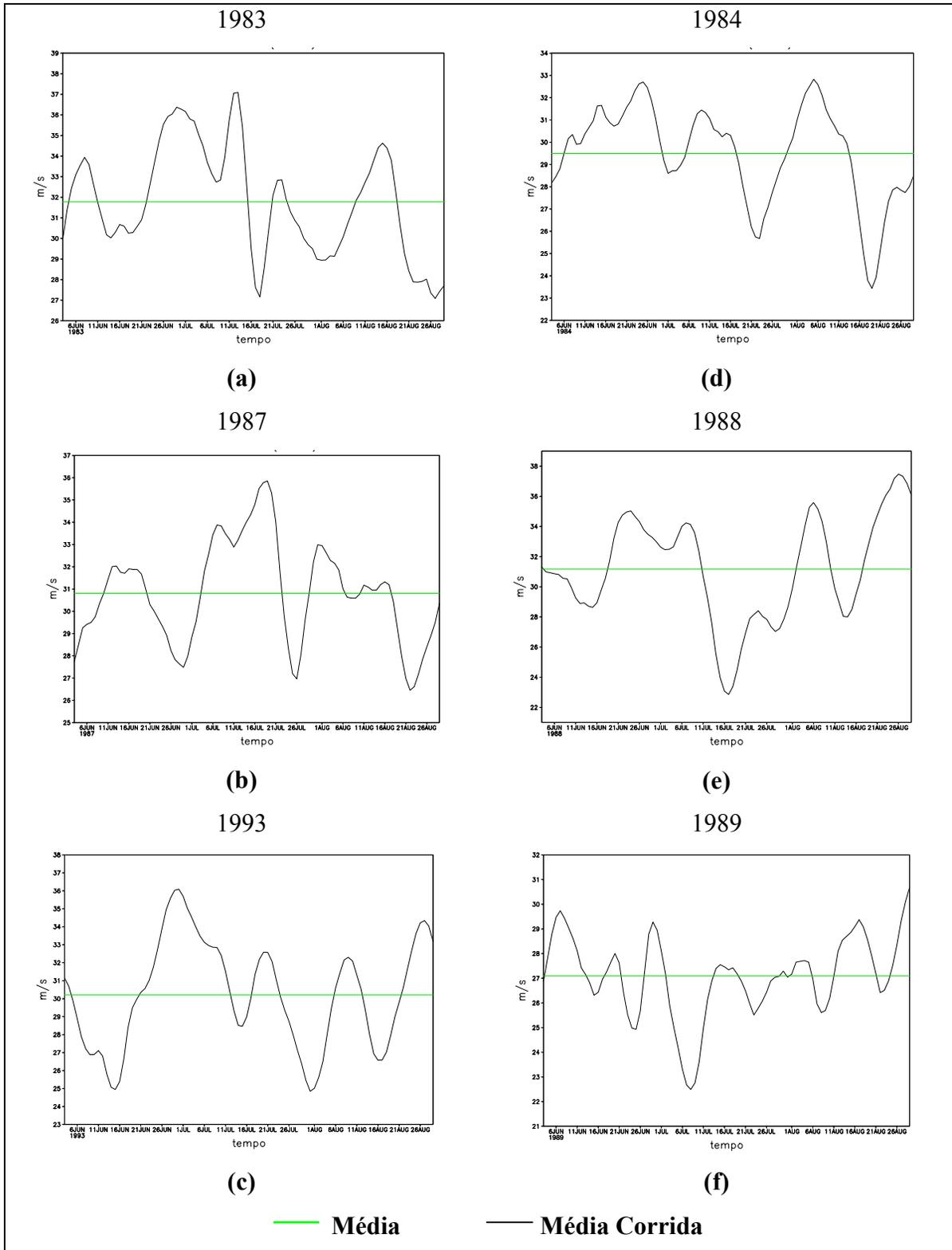
**Fig. 4.9** - Média do vento zonal em intervalos de 5 m/s; (a) Período El Niño; (b) Período de La Niña; (c) Contraste entre El Niño e La Niña em intervalos de 0.5  $\text{ms}^{-1}$

A variação da intensidade e frequência do vento zonal, no período de inverno para os seis anos estudados pode ser observada através da Figura. 4.10, onde foi calculado uma média corrida de cinco dias, a fim de diminuir os possíveis ruídos no sinal.

Nota-se que de uma forma geral em anos de El-Niño, o vento zonal apresenta um comportamento oscilatório bem parecido para os anos de 1983-87 (ver Figuras. 4.10 a e b), porém com uma pequena defasagem de cinco dias no pico de máxima velocidade. No ano de 1983 o máximo (38 m/s) ocorre no dia 11 de julho, enquanto para 1987 o máximo (36 m/s) ocorre no dia 16 do mesmo mês. O pico de mínima intensidade apresenta uma defasagem de dez dias, entre os dias 16 e 26 de julho aproximadamente. O mesmo não pode ser observado no ano de 1993 (Figura.4.10c), neste caso o jato atinge a máxima intensidade no final de junho (dia 27) e a mínima no início de agosto (dia 1), destoando-se do comportamento anterior. A variação da amplitude para os três anos é de aproximadamente 10 m/s (Figuras 4.10 a, b, c).

No período La-Niña, o vento zonal não apresenta um comportamento oscilatório definido, pois em cada ano verificam-se amplitudes diferentes. O pico máximo ocorre em agosto, diferenciando-se dos anos de El Niño onde o máximo ocorre em julho. Para o ano de 1989 em especial, o vento zonal apresenta maiores frequência do que nos outros anos.

As variações de baixa frequência do vento zonal podem ser associadas ao “index cycle” ou vacilação sugerido por Namias (1950). Este índice representa a interação entre os distúrbios transientes e o vento zonal, mostrando as oscilações de baixa frequência em intervalos de duas semanas a dois meses, embora esses intervalos não sejam suficientemente uniformes para que o índice mostre uma periodicidade.



**Fig. 4.10** - Média corrida de cinco dias do vento zonal em  $\text{ms}^{-1}$  para o período de inverno; (a,b,c) El Niño; (d,e,f) La Niña.

De acordo com a Figura. 4.10 pode-se observar que os anos de El Niño e La Niña mostram situações de alto e baixo índice ou vacilação, com flutuações quase-periódicas com um aparente período de aproximadamente três semanas. Na situação de alto índice os ventos de oeste são mais elevados em relação a média e deslocados em direção ao pólo, com um escoamento mais zonal não favorecendo o desenvolvimento de distúrbios. Uma situação inversa, ou seja, com baixo índice os ventos de oeste encontram-se mais fracos em relação à média, e deslocados em direção ao equador, associados a um escoamento mais ondulatório, sendo neste caso favorável à formação de distúrbios. Essa vacilações resultam em instabilidade baroclínica não-linear e as ondas de média escala exibem um definido ciclo de vida, crescimento baroclínico, maturidade e decaimento barotrópico (Randel, W.; Stanford, J.L. 1985a).

## CAPÍTULO 5

### SUMÁRIO E CONCLUSÕES

No presente estudo foram utilizados dois métodos para explicar a manutenção da corrente de jato sobre a América do Sul na estação de inverno. O primeiro, baseia-se na análise do balanço de energia cinética total através da circulação transversal em torno da corrente de jato pelo vento ageostrófico, utilizando-se treze anos de dados mensais derivados da reanálise do NCEP, entre os anos de 1982 a 1994. No segundo, a manutenção da corrente de jato é estudada baseando-se no conceito de energia cinética do estado básico e turbulento utilizando seis anos de dados médios diários da reanálise do NCEP, sendo três de El Niño (1983, 1987, 1993) e três da La Niña (1984, 1988, 1989).

#### **Baseado neste estudo conclui-se que:**

a) A análise climatológica média realizada para a corrente de jato, confirma a posição média e a variabilidade da intensidade da CJS e CJP, descritas na literatura em geral. A CJS encontrou-se centrada em aproximadamente 30°S, ao nível de 200 hPa, apresentando uma variabilidade maior do que a CJP, devido a sua localização na região preferencial para passagens de sistemas sinóticos de médias latitudes. A CJP encontrou-se localizada entre as latitudes de 50-60°S, acima do nível de 200 hPa, estendendo-se além de 100 hPa.

b) De uma forma geral a CJS encontrou-se mais intensa para o período de El Niño do que para os outros períodos, durante este fenômeno ocorre um aquecimento anômalo nas águas do Pacífico leste equatorial, aumentando assim nesta região a convecção e a liberação de calor latente, e em consequência a atmosfera é aquecida, aumentando

portanto o gradiente de temperatura Norte-Sul que é o principal subsídio para a formação e intensificação corrente de jato.

c) O padrão de circulações médias transversais no nível da corrente de jato, apresentou-se coerente com o padrão idealizado para os anos de El Niño, mostrando-se de forma menos nítida do que o esperado para os anos de La Niña. Para os outros anos, a circulação transversal mostra-se bem definida na entrada da CJS, porém na saída nem sempre o padrão está coerente, nestes anos é observada a presença quase que permanente da CJP. Os resultados mostram, que alguns problemas de interpretação surgem com o uso das circulações transversais nas regiões de entrada e saída da corrente de jato no padrão de vento ageostrófico, como: a proximidade da CJS nas regiões em que a geostrofia não é válida, processos computacionais imperfeitos e, como sugerido por Blackburn (1985), o uso da definição de geostrofia usando o parâmetro de coriolis variável ou constante.

d) De uma forma geral a descrição da circulações médias transversais implica em divergência (convergência) do campo de vento zonal no nível da corrente de jato acompanhada de convergência (divergência) do vento zonal na direção oposta em baixos níveis. Não podendo ser confirmada, devido a pequena quantidade de anos estudado, a existência de um limite padrão entre altos e baixos níveis em que ocorre esta circulação em direção oposta.

e) A corrente de jato pode ser localmente mantida através das circulações transversais, pelo balanço entre a energia cinética gerada pelo escoamento ageostrófico e a divergência do fluxo de energia. As circulações transversais direta e indireta são responsáveis pelas conversões de energia potencial disponível em cinética ( $P_m \Rightarrow K_m$ ) na entrada da corrente de jato, e pelas conversões de energia cinética para potencial disponível ( $K_m \Rightarrow P_m$ ). O estudo dessas circulações deve evidenciar áreas de divergência-convergência tanto na alta como na baixa troposfera. Esses padrões,

dependendo da energia disponível, podem gerar instabilidades que favoreçam o surgimento e a manutenção dos sistemas convectivos de mesoescala.

f) Os anos de El Niño e La Niña mostram situações de alto e baixo índice ou vacilação, com flutuações quase-periódicas com um aparente período de aproximadamente três semanas. Na situação de alto índice os ventos de oeste são mais elevados em relação a média, apresentando um escoamento mais zonal não favorecendo o desenvolvimento de distúrbios. Uma situação inversa, ou seja, com baixo índice, os ventos de oeste encontram-se mais fracos em relação a média, e associados a um escoamento mais ondulatorio, sendo neste caso favorável a formação de distúrbios.

g) Durante os períodos em que o fenômeno El Niño esteve presente, a corrente de jato se manteve intensa em média por uma troca de energia potencial turbulenta para cinética turbulenta ( $Pe \Rightarrow Ke$ ) através de movimentos verticais, seguida de uma troca de energia cinética turbulenta para cinética do estado básico ( $Ke \Rightarrow Km$ ), e ainda uma troca de energia cinética do estado básico para potencial do estado básico ( $Km \Rightarrow Pm$ ), devido a movimentos meridionais forçados pela célula de Ferrel.

h) Durante o período de La Niña a corrente de jato em média perdeu energia cinética do estado básico para os movimentos meridionais forçados pela célula de Ferrel ( $Km \Rightarrow Pm$ ) e para os distúrbios baroclínicos ( $Km \Rightarrow Ke$ ), precedida de uma troca de energia potencial turbulenta para cinética turbulenta ( $Pe \Rightarrow Ke$ ) através de movimentos verticais, desintensificando desta forma a corrente de jato.

### **Sugestões para os próximos estudos:**

- Visto que a manutenção de energia sofre a influência de alguns fluxos externos, devido à utilização de uma área limitada, sugere-se que seja realizado um estudo abrangendo todo Hemisfério Sul;

- Incluir no estudo da energética o cálculo de energia potencial disponível do estado básico e turbulento;

- Realizar um estudo de caso, analisando a influência da corrente de jato na precipitação na região da América do Sul, levando em conta os seus efeitos de curvatura;

- Estudar a manutenção de energia na corrente de jato, utilizando como período de estudo, duas estações de transição (primavera e outono), analisando os possíveis contrastes entre as mesmas;

-Ao invés de calcular a energética na corrente de jato em um único nível isobárico, como feito, expandir para os outros níveis, integrando verticalmente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arkin, P.A. The relationship between interannual variability in the 200 mb tropical wind field and the southern oscillation. *Monthly Weather Review.*, v.110, n. 10, p. 1393-1404, Jun. 1982.
- Beebe, R.G.; Bates, F.C. A mechanism for assisting in the realise of convective instability. *Monthly. Weather Review*, v.83, n. 11, p.1-10, Jul. 1955.
- Bjerknes, J. A possible response of the atmosphere hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, v. 18, n. 4, p. 820-829, 1966.
- Blackburn, M. Interpretation of ageostrophic winds and implications for jet stream maintenance. *Journal Atmospheric.Sciences*, v. 42, n. 23, p. 2604-2620, Jun.1985.
- Blackmon, M.L.,Wallace, J.M, Lau, N.C, Mullen, S.L. An observational study of the northern hemisphere wintertime circulation. *Journal Atmospheric.Sciences*, v. 34, n. 7, p. 1040-1053, Jul.1977.
- Bluestein, H.B. *Synoptic-dinamic meteorology in midlatitudes*. Oxford: University Press, 1993. V.2.
- Carlson, T.N. *Mid-latitude weather systems*. London: Harper Collins Academic, 1991.
- Charney, J. G.; Drazin, P.G. Propagation of planetary scale waves from the lower atmosphere to the upper atmosphere. *Journal of the Geophysical Research*, v. 66, n.1, p. 83-109, Jan. 1961.
- Chen, T.C., Tzeng, R.Y, Vanloon, H. A study on the maintenance of the winter subtropical jet stream in the northen hemisphere. *Tellus*, v.40A, p. 392-397, May.1988.
- Climanálise: boletim de monitoramento e análise climática. São José dos Campos, v. 3, n.7, jan. 1988. 52p.

- Doty, B.E. *Using the grid analysis and display system - Grads*. College Park, MD, University of Maryland. Center for ocean - Land - Atmosphere Interactions (COLA), 1988.
- Guedes, R.L. *Condições de grande escala associado a sistemas convectivos de mesoescala sobre a região central da América do Sul*. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Meteorologia). Universidade de São Paulo, 1985.
- Halpert, M.S.; Ropelewski, C.F. Surface temperature patterns associated with the southern oscillation. *Journal of Climate*, v.5, n. 6, p. 577-593, Mar. 1992.
- Hastenrath, S.: *Climate dynamics of the tropics*. Updated ed. from Climate and Circulation of the Tropics. Kluwer Academic Publishers, 1991. 488p.
- Holopainen, E.O. On the role of mean meridional circulations in the energy balance of the atmosphere. *Tellus*, v.17, n.10, p. 285-294, 1965.
- Holopainen, E. A Diagnostic Study of the Kinetic Energy of the Long Term Meanflow and the associated Transient Fluctuations in the atmosphere. *Geophysica*, v.15, n. 12, p. 125-145, 1978.
- Krisnamurti, T. N.: The subtropical jet stream of winter. *Journal of Meteorology*, v. 18, n.1, p 172-191, Apr.1979.
- Kalnay, E. ,and co-authors. The NCEP/NCAR 40 years reanalysis project. *Bulletin of American Meteorological Society*, v.77, n.3, p. 437-471, Mar.1996.
- Kousky, V., e Cavalcanti, I. F. A. Eventos Oscilação Sul - El Niño: Características, Evolução e Anomalias de Precipitação. *Ciência e cultura*, v.36, n.11, p. 1888-1889, Nov.1984.
- Mahlman, J.D. On the maintenance of the polar front jet stream. *Journal Atmospheric Science*, v. 30, p. 544-557, May. 1973.
- Medina, M. *Meteorologia básica sinóptica*. Madrid: Paraninfo, 1976.

- Moore, J.T.; Vanknowe, G.E. The effect of jet-streak curvature on kinematic fields. *Monthly Weather Review*, v.120, n.11, p. 2429-2441, Nov. 1992.
- Namias, J. The index cycle and its role in the general circulation. *Journal of Meteorology*. v. 7, n.11, p. 130-139, 1950.
- Nobre, C. A., A. S. de Oliveira and E. K. Neves. Precipitation and circulation anomalies in South America and the 1982-83 El Niño/southern oscillation episode. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 4., Brasília,1986. *Anais*. São José dos Campos: INPE, 1986. v. 1, p 339-345.
- Palmén, E., Newton C.W.: *Atmospheric circulation systems*. New York: Academic Press., 1969. 603p.
- Pezzi, L.P., e Cavalcanti, I. F. A. O jato subtropical sobre a América do Sul no período de 1980 a 1989. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 7., Belo Horizonte, 1994. *Anais*. São José dos Campos: INPE, 1994. v.2, p.148-151.
- Pezzi, L.P., Rosa, M.B., Batista, N.N.M. A corrente de jato subtropical sobre a América do Sul. *Climanálise Edição Especial Outubro/1996*. Edição especial comemorativa de 10 anos.
- Randel, W., Stanford, J.L. An observational study of medium-scale waves dynamics in the southern hemispheric summer. Part I: Waves structure and energetics. *Journal Atmospheric.Sciences*, v.42, n.11, p.1172-1188, Out. 1995.
- Rasmusson, E.M. ; Wallace, J.M. Meteorological aspects of the El Niño/southern oscillation. *Science*, v.222, n.4629, p 1195-1202, Dec. 1983.
- Reiter, E. R. *Jet stream meteorology*. Chicago: The University of Chicago Press, 1969. 515p.
- Riehl, H., Badner, J., Hoyde, J.E. *Forecasting in the middle latitudes*. Meteorological Monographs. American Meteorological.Society, v.1, n..5, 1952. 80p.

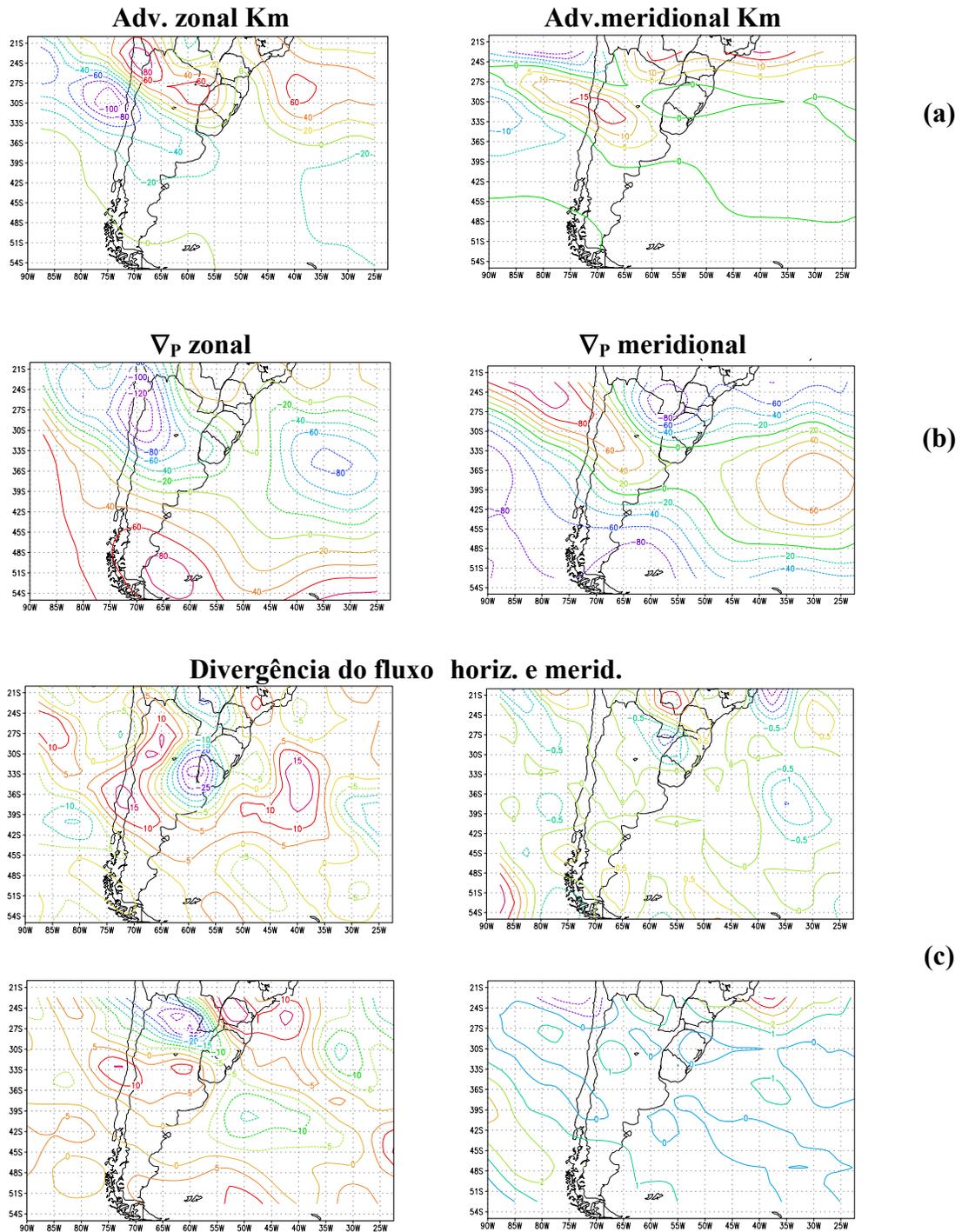
- Riehl, H. Tropopause circulations and jet stream. World survey climatology. *Climate of Free Atmosphere*, v.4, p. 85-204, 1969.
- Rossby, C.G. On the distribution of angular velocity in gaseous envelopes under the influence of large-scale horizontal mixing process. *Bulletin of American Meteorological Society*, v.28, n. 78, p. 53-68., 1947.
- Sechrist, F.S.; Whittaker, T.M. Evidence of jet stream vertical circulations. *Monthly Weather Review*, v. 107, p. 1014-1021, Aug.1979.
- Severo, D. L. *Estudo de casos de chuvas intensas em Santa Catarina*.1994. 118p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – INPE, São José dos Campos, 1994. (INPE – 5682-TDI/568).
- Severo, D. L., M. A. Gan e N. J. Ferreira. Estudo de casos de chuvas intensas associado a enchentes na região do Vale do Itajaí, em Santa Catarina..In. Congresso Brasileiro de Meteorologia, 7., Belorizonte, 1994. *Anais*. São José dos Campos: INPE, 1994. v.2, p. 561-564..
- Tremberth, K.E.; Hoar , J.J. The 1990-1995 El Niño-southern oscillation event: longest on record. *Geophysical Research Letters*, v. 23, n.1, p. 57-60, Jan. 1996.



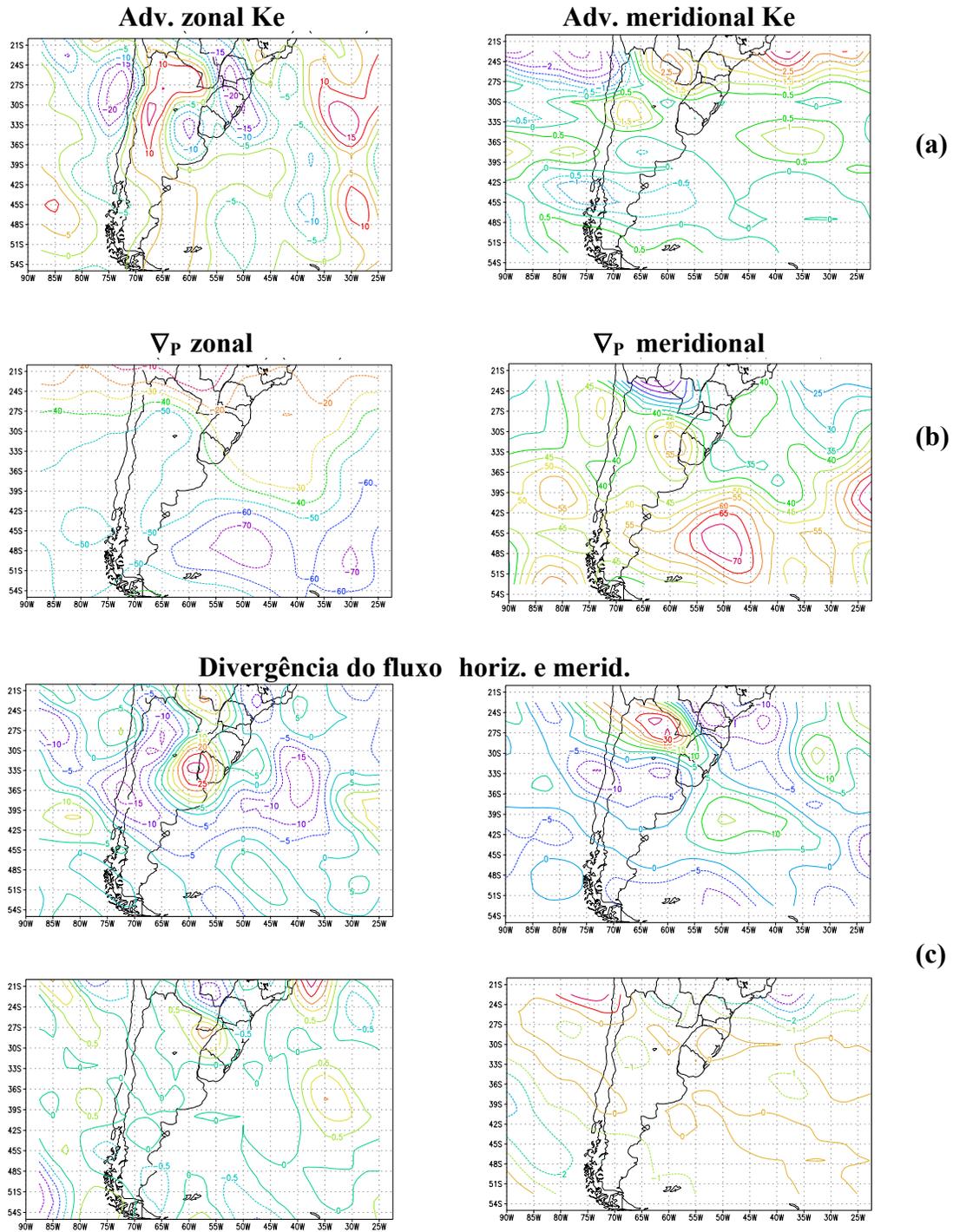
## APÊNDICE A

### **COMPONENTES DO BALANÇO DE ENERGIA CINÉTICA DO ESTADO BÁSICO E TURBULENTO PARA O EL NIÑO DE 1983**

Neste apêndice serão apresentados os valores de cada termo das Equações de energia cinética do estado básico (2.14) e turbulento (2.15), os quais foram mostrados no capítulo 2 (subítem 3.2.2) sobre a região da América do Sul para o período de El Niño, 1983 (Figs. A.1 e A.2).

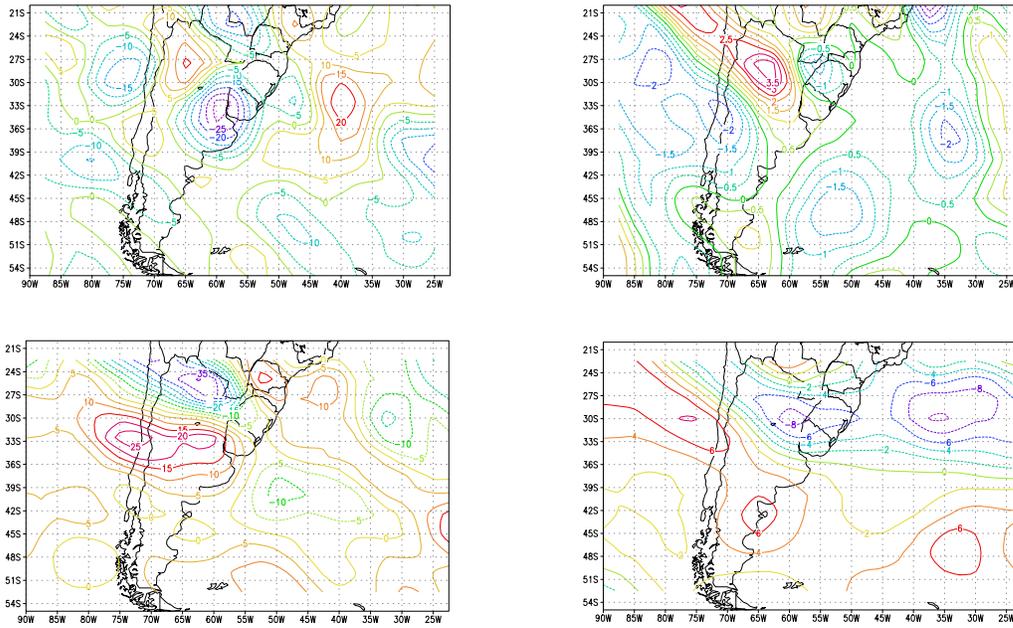


**Fig. A.1** - Componentes do balanço de energia cinética do estado básico em 200 hPa, para o ano de 1983 (El Niño); (a) Advecção de Km; (b) Termos conversão (Km $\Rightarrow$  Pe) e vice-versa; (c) Termos de conversão (Km $\Rightarrow$  Ke) e vice-versa. Unidades:  $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ .



**Fig. A.2** - Componentes do balanço de energia cinética turbulenta em 200 hPa para 1983 (El Niño); (a) Advecção de Ke; (b) Termo de conversão entre (Ke $\Rightarrow$ Pe) e vice-versa; (c) Termo de conversão entre (Km $\Rightarrow$ Ke); (d) Fluxos Externos. Unidades:  $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ . (continua)

### Fluxos externos



(d)

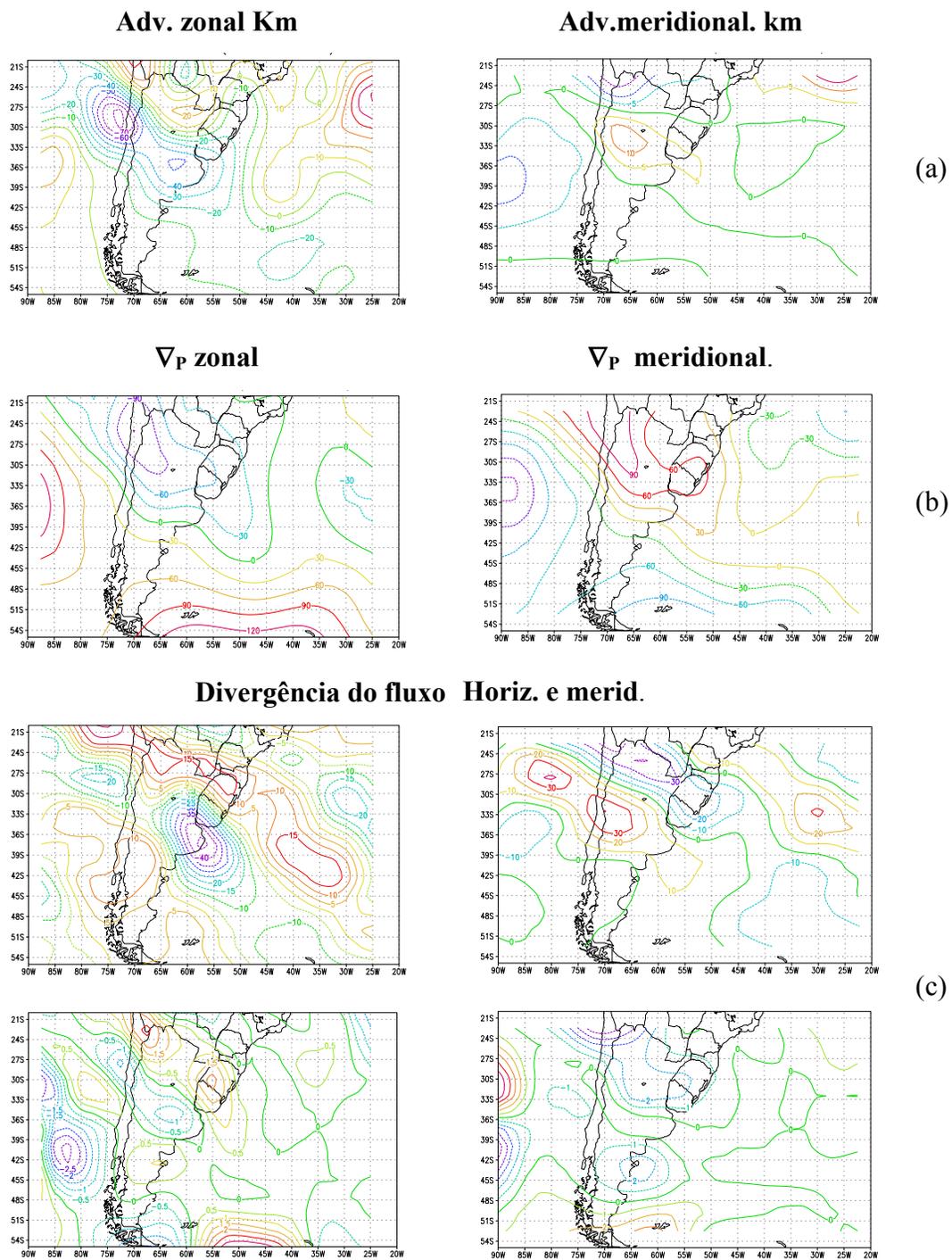
Fig. A.2 - Conclusão.



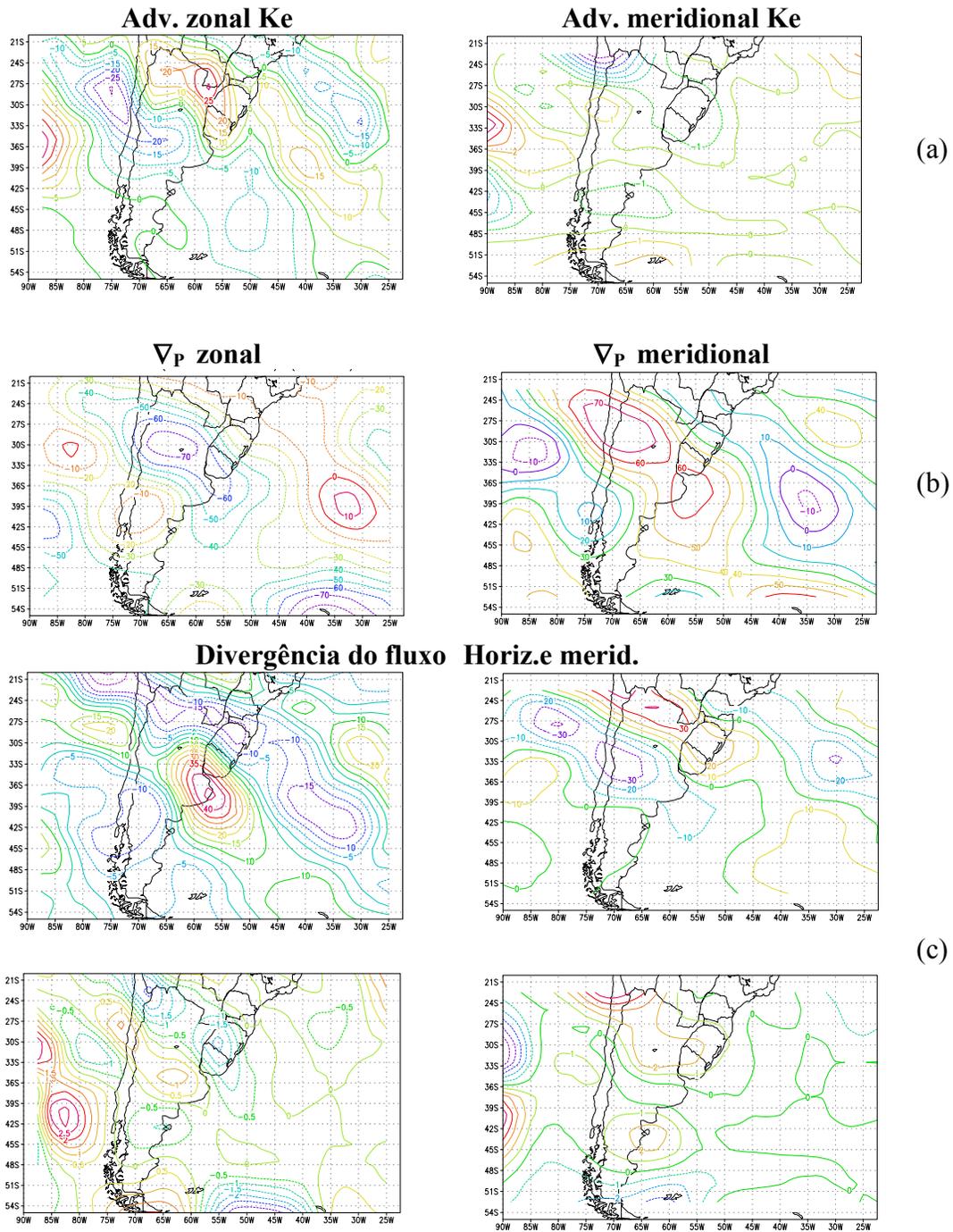
## **APÊNDICE B**

### **COMPONENTES DO BALANÇO DE ENERGIA CINÉTICA DO ESTADO BÁSICO E TURBULENTO PARA A LA NIÑA DE 1984**

Neste apêndice serão apresentados os valores de cada termo das Equações de energia cinética do estado básico (2.14) e turbulento (2.15), os quais foram mostrados no capítulo 2 (subitem 3.2.2) sobre a região da América do Sul para o período de La Niña, 1984 (Figs. B.1 e B.2).



**Fig. B.1** - Componentes do balanço de energia cinética do estado básico em 200 hPa, para o ano de 1984 (La Niña); (a) Advecção de Km; (b) Termos de conversão (Km $\Rightarrow$ Pe) e vice-versa; (c) Termos de conversão conversão (Km $\Rightarrow$ Ke) e vice-versa. Unidades:  $10^{-4}m^2s^{-3}$ .



**Fig. B.2** - Componentes do balanço de energia cinética turbulenta em 200 hPa para 1984 (La Niña); (a) Advecção de Ke; (b) Termo de conversão entre (Ke $\Rightarrow$ Pe) e vice-versa; (c) Termo de conversão entre (Km $\Rightarrow$ Ke); (d) Fluxos Externos. Unidades:  $10^{-4} \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ . (continua)

## Fluxos Externos

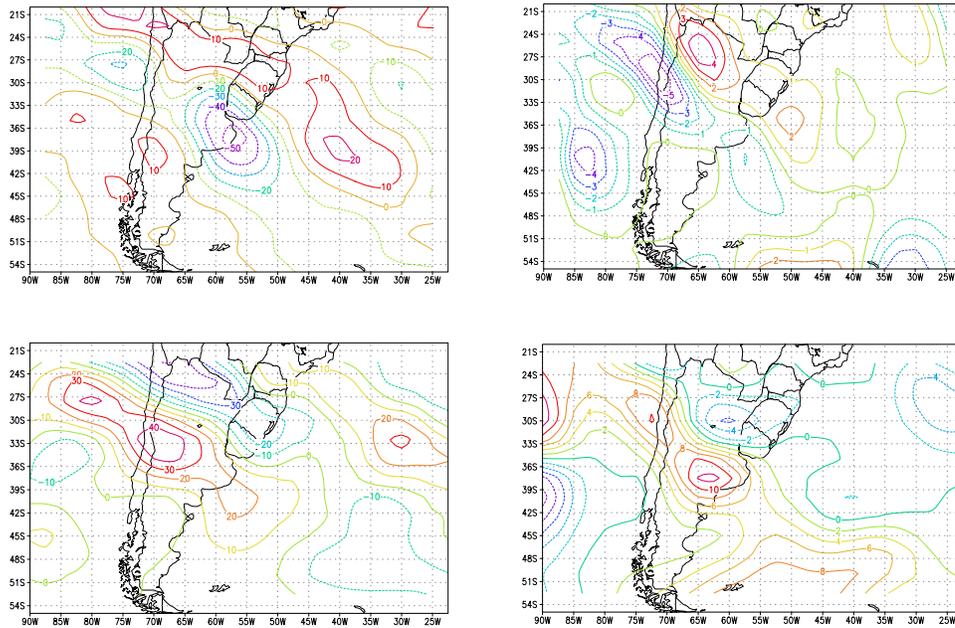


Fig. B.2 - Conclusão.